

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA**

**Fakulta materiálově-technologická**

**Katedra tváření materiálu**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Experimentální stanovení deformačních odporů slitiny INCOLOY 825 za tepla**

**Experimental determination of flow stress of INCOLOY 825 in hot forming**

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Roman Coufal**

Studijní program: N2109 Metalurgické inženýrství

Studijní obor: 2109T038 Moderní metalurgické technologie

Téma: Experimentální stanovení deformačních odporů slitiny INCOLOY 825  
za tepla  
Experimental determination of flow stress of INCOLOY 825 in hot  
forming

Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor – deformační odpory vybraných niklových slitin, vliv dynamického uzdravování
2. Zkoušky jednoosým tlakem za tepla
3. Matematické zpracování experimentálních dat a sestavení prostorové mapy deformačních odporů
4. Diskuse a porovnání získaných výsledků

### Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] RUSZ, S., P. KAWULOK, I. SCHINDLER, R. KAWULOK, P. OPĚLA a K. HRBÁČEK. Plastické a pevnostní vlastnosti vybraných niklových slitin za tepla. *Kovárenství*. 2015, (54), 42-45.
- [2] OPĚLA, P., I. SCHINDLER, P. KAWULOK, F. VANČURA, R. KAWULOK, S. RUSZ a T. PETREK. Hot flow stress models of the steel C45. *Metalurgija*. 2015, 54(3), 469-472.
- [3] LEE, W.-S. a T. N. SUN. Plastic Flow Behaviour of Inconel 690 Super Alloy Under Compressive Impact Loading. *Materials Transactions*. 2004, 45(7), 2339-2345.
- [4] PAN, Z., et al. Microstructure-sensitive flow stress modeling for force prediction in laser assisted milling of Inconel 718. *Manufacturing Review*. 2017, 4(6), 1-9.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

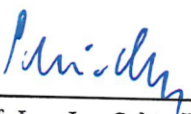
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Rostislav Kawulok, Ph.D.**

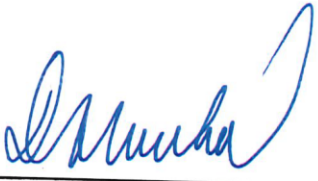
Konzultant diplomové práce: Ing. Petr Kawulok, Ph.D.

Datum zadání: 30.11.2018

Datum odevzdání: 23.04.2019



  
prof. Ing. Ivo Schindler, CSc.  
vedoucí katedry

  
prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.  
děkanka fakulty

# Zásady pro vypracování diplomové práce

## I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

## II.

### Uspořádání diplomové práce:

- |  |  |
|--|--|
| 1. Titulní list  | 6. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky |
| 2. Originál zadání DP  | 7. Obsah DP                                  |
| 3. Zásady pro vypracování DP   | 8. Textová část DP                           |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení   | 9. Seznam použité literatury                 |
| 5. Prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP | 10. Přílohy                                  |

- ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.
- ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.
- ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP.
- ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP.
- ad 5) V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.
- ad 6) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.
- ad 7) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.
- ad 8) Textová část DP obvykle zahrnuje:
- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
  - Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
  - Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 10).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 9) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků. Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690. Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.
- ad 10) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

### III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*  
*Fakulta materiálově - technologická*  
*Katedra .....*

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení DP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

### IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia Fakulty materiálově – technologické, Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2018/2019.

Ostrava 12. 11. 2018

  
**Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.**  
děkanka Fakulty materiálově- technologické  
VŠB-TU Ostrava



# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 16. 4. 2019.

Roman Čepel  
.....  
podpis (jméno a příjmení studenta)

## **Poděkování**

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce Ing. Rostislavu Kawulokovi, Ph.D. za jeho cenné rady, pozitivní a motivující přístup a ochotu při konzultacích a vypracování mé diplomové práce. Dále děkuji konzultantu Ing. Petru Kawulokovi, Ph.D. Rád bych také poděkoval své rodině za podporu při studiu a trpělivost při psaní této práce. Tato práce byla vytvořena s podporou projektu DMS - CZ.02.1.01/0.0/0.0/17\_049/0008399 a projektů studentské grantové soutěže SP2019/43 a SP2019/86 podporovaných na VŠB – TU Ostrava Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

## ABSTRAKT

Coufal, R. *Experimentální stanovení deformačních odporů slitiny INCOLOY 825 za tepla*.  
Ostrava: katedra tváření materiálu, VŠB-TU Ostrava, 2019. 56 s.

Diplomová práce, vedoucí: Ing. Rostislav Kawulok, Ph.D.

V této diplomové práci byl na základě zkoušek jednoosým tlakem na plastometru Gleeble 3800 stanoven přirozený deformační odpor niklové slitiny INCOLOY 825. Z těchto dat byla v softwaru ENERGY 4.0 vypočtena aktivační energie při tváření za tepla a následně predikovány hodnoty odpovídající napětíovému píku. Pro matematický popis deformačního odporu slitiny INCOLOY 825 byly vybrány dva modely, a to Schindler aj. a Hensel-Spittel. K vyčíslení konstant obou modelů posloužil software Unistat a jeho funkce nelineární regresní analýzy. Z nově získaných hodnot byly sestaveny pro oba modely prostorové 3D mapy přirozeného deformačního odporu v závislosti na deformaci a Zener-Hollomonovu parametru. Bylo zjištěno, že pro popis přirozeného deformačního odporu slitiny INCOLOY 825 je možné použít oba testované modely, i když mají jisté výhody a nevýhody.

**Klíčová slova:** Model deformačního odporu, INCOLOY 825, jednoosá zkouška tlakem, Gleeble 3800

## ABSTRACT

Coufal, R. *Experimental determination of flow stress of INCOLOY 825 in hot forming*.  
Ostrava: Department of Material Forming, VŠB-Technical University of Ostrava, 2019. 56 s.

Diploma thesis, head: Ing. Rostislav Kawulok, Ph.D.

In this diploma thesis was determined on the basis of uniaxial compression on Gleeble 3800 plastic the deformation resistance of the nickel slot INCOLOY 825. From these data was calculated the activation energy for hot forming in ENERGY 4.0 software and then the predicted value corresponding to a stress peak. For the mathematical description of the flow stress of the INCOLOY 825 alloy were chosen two models, Schindler et al. and Hensel-Spittel. The Unistat software and its nonlinear regression analysis function were used to quantify constants for both models. From the newly obtained values were compiled for both models 3D maps of the natural flow stress in relation to the deformation and the Zener-Hollomon parameter. Was found that for natural flow stress of the alloy INCOLOY 825 it is possible to use both tested models although they have certain advantages and disadvantages.

**Key words:** flow stress model, INCOLOY 825, uniaxial compression test, Gleeble 3800

---

|  |        |
|--|--------|
| 1. Úvod .....  | - 1 -  |
| 2. Teoretický rozbor .....                                       | - 2 -  |
| 2.1. Nikl.....   | - 2 -  |
| 2.1.1. Fyzikální a chemické vlastnosti niklu.....                | - 3 -  |
| 2.1.2. Magnetické vlastnosti niklu.....                          | - 3 -  |
| 2.1.3. Použití niklu.....  | - 4 -  |
| 2.1.4. Slitiny niklu .....                                       | - 5 -  |
| 2.1.4.1. Technicky čistý nikl .....                              | - 5 -  |
| 2.1.4.2. Superslitiny .....                                      | - 6 -  |
| 2.1.4.3. Korozivzdorné slitiny na bázi niklu .....               | - 6 -  |
| 2.1.4.4. Slitiny INCOLOY a INCONEL .....                         | - 7 -  |
| 2.2. Uzdravovací procesy .....                                   | - 8 -  |
| 2.2.1. Dynamické uzdravování .....                               | - 10 - |
| 2.2.1.1. Dynamická rekystalizace .....                           | - 12 - |
| 2.3. Aktivační energie při tváření za tepla .....                | - 12 - |
| 2.4. Deformační odpory .....                                     | - 14 - |
| 2.4.1. Definice deformačního odporu .....                        | - 14 - |
| 2.4.2. Typy křivek napětí-deformace.....                         | - 14 - |
| 2.4.3. Deformační chování materiálu za studena.....              | - 16 - |
| 2.4.4. Matematický popis křivek napětí-deformace za studena..... | - 16 - |
| 2.4.5. Matematický popis křivek napětí-deformace za tepla .....  | - 17 - |
| 2.4.5.1. Model Sellars .....                                     | - 17 - |
| 2.4.5.2. Model Fields-Backofen .....                             | - 18 - |
| 2.4.5.3. Model Mirzadeh a Najafizadeh .....                      | - 19 - |
| 2.4.5.4. Ostatní používané modely .....                          | - 19 - |
| 2.4.6. Deformační odpory vybraných niklových slitin .....        | - 20 - |
| 3. Cíle práce.....   | - 25 - |
| 4. Experiment .....  | - 26 - |
| 4.1. Postup experimentu.....                                     | - 26 - |
| 4.2. Slitina INCOLOY 825 .....                                   | - 26 - |
| 4.3. Plastometr Gleeble 3800 .....                               | - 27 - |
| 4.4. Popis softwaru ENERGY 4.0.....                              | - 28 - |
| 4.5. Popis softwaru Unistat .....                                | - 29 - |

---

|  |        |
|--|--------|
| 4.6. Výpočet deformačního odporu pomocí modelu Schindler aj. ....  | - 29 - |
| 4.7. Výpočet deformačního odporu pomocí modelu Hensel-Spittel..... | - 30 - |
| 4.8. Analýza křivek napětí - deformace .....                       | - 30 - |
| 5. Diskuze výsledků.....   | - 35 - |
| 5.1. Stanovení aktivační energie za tepla .....                    | - 35 - |
| 5.2. Výpočet materiálových konstant pro model Schindler aj. ....   | - 38 - |
| 5.3. Výpočet materiálových konstant pro model Hensel-Spittel.....  | - 43 - |
| 5.4. Porovnání matematických modelů s experimentálními daty .....  | - 47 - |
| 5.5. Porovnání zkoumané slitiny INCOLOY 825 s dalšími zdroji ..... | - 50 - |
| 6. Závěr.....  | - 52 - |
| Literatura .....   | - 54 - |



## 1. Úvod

Vývoj nových progresivních technologií si vynutilo vyvinutí zcela nových odolných materiálů, které odolávají velmi agresivním prostředím, především pak mechanickému namáhání za vysokých teplot. Tyto materiály uplatnily své odolné vlastnosti zejména v chemickém, ropném a především v leteckém průmyslu pro zvýšení výkonu leteckých a raketových motorů. Stále se zvyšující požadavky nejsou spojeny pouze s pevnostními vlastnostmi, ale souvisí také s vysokou odolností materiálů proti náhlým teplotním změnám a s mnoha dalšími technologickými vlastnostmi, jako je například tvařitelnost materiálu.

V posledních letech materiály jako niklové slitiny dosáhly velkého posunu vpřed, a to především v oblasti, kterou tvoří superslitiny niklu. Tyto slitiny obsahují asi 15 % chromu a jsou zastoupeny ve skupině slitin s vynikající odolností proti korozi. Superslitiny niklu uvádějí polykomponentní materiály, které mohou být žárupevné i žáruvzdorné a odolávají po určitou dobu teplotní únavě, creepu, korozi a erozi v agresivním prostředí. Nacházejí uplatnění v oblastech, kde dochází k dlouhodobému namáhání při vysokých teplotách.

V prezentované diplomové práci bude testována niklová superslitina INCOLOY 825, která je charakteristická svou výbornou odolností proti lokalizované a celkové korozi za různých podmínek. Tato slitina má dobré mechanické vlastnosti při kryogenních až mírně vysokých teplotách.

Hlavním cílem práce bude popis přirozených deformačních odporů za tepla zkoumané niklové slitiny na základě fyzikálních experimentů, jejichž výsledky budou následně využity pro matematický popis přirozených deformačních odporů v širokém rozsahu teplot, deformačních rychlostí a deformací. Pro matematický popis přirozeného deformačního odporu zkoumané slitiny budou vybrány dva modely lišící se od sebe fyzikálním či fenomenologickým základem. Jako vstupní data pro získání predikovaných deformačních odporů poslouží hodnoty získané jednoosou tlakovou zkouškou na plastometru Gleeble 3800.

## 2. Teoretický rozbor

### 2.1. Nikl

Axel Fredrik Cronstedt objevil prvek Ni v roce 1751 v kobaltovém dolu v Loose v Helsinglandu ve Švédsku. V roce 1775 byl poprvé připraven čistý nikl chemikem T. Bergmanem. Pro získávání niklu se používají rudy, kde se nikl zpravidla vyskytuje jako oxid ve směsi s železem (laterit a garnierit) nebo jako sulfid nikelnato-železitý neboli pentlandit **obr. 1** [1, 2].

Nejběžnějším způsobem výroby niklu ze sulfidických niklových rud je Orfordův proces, tento proces spočívá v tavení niklové rudy za přítomnosti síranu sodného a koksu. Nikl následně přechází ze sulfidu na oxid, který je redukován na surový kov.

V přírodě nikl většinou doprovází síru a železo. Předpokládá se, že nikl se z převážné části nachází v zemském vnitřním a vnějším jádře [3].



**Obr. 1** Pentlandite – hlavní zdroj niklu [2]

Většina získaného niklu je pak dále spotřebována na různé slitiny s dalšími kovy (železo, chrom, hliník, zinek), až 65% světové produkce pak na nerezové oceli. V našem každodenním životě se s ním setkáváme v podobě mincí a produktů z korozivzdorných ocelí [3].

### 2.1.1. Fyzikální a chemické vlastnosti niklu

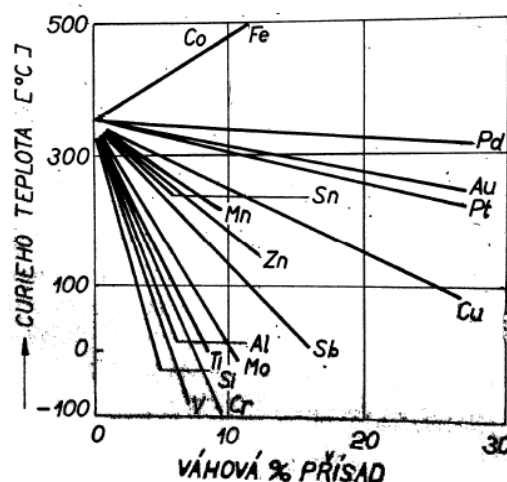
Nikl je stříbrošedý, tvárný a kujný kov. Je dobrým vodičem elektrického proudu. Nikl je neušlechtilý kov, který má kubickou plošně centrovanou mřížku. Vlastnosti, které jsou nejdůležitější pro použití niklu v průmyslu, jsou jeho výborná odolnost vůči korozi a pevnost za vysokých teplot. Shrnutí fyzikálních vlastností niklu je uvedeno v **tab. 1** [4, 5].

**Tab. 1** Fyzikální vlastnosti niklu[5]

|  |           |
|--|-----------|
| Protonové číslo  | 28        |
| Relativní atomová hmotnost   | 58,69     |
| Struktura  | KSC (bcc) |
| Hustota [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]  | 8,908     |
| Molární objem [ $\text{cm}^3$ ]  | 6,59      |
| Teplota tání [ $^{\circ}\text{C}$ ]  | 1455      |
| Teplota varu [ $^{\circ}\text{C}$ ]  | 2913      |
| Tepelná vodivost při $20^{\circ}\text{C}$ [ $\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ ] | 70,3      |
| Elektrická vodivost při $20^{\circ}\text{C}$ [ $\mu\Omega\cdot\text{m}$ ]              | 0,096     |

### 2.1.2. Magnetické vlastnosti niklu

Nikl je jeden ze tří prvků, které jsou silně feromagnetické (zbylé dva jsou kobalt a železo). Nikl je feromagnetický až do teploty  $357^{\circ}\text{C}$ , tato hodnota se nazývá jako Curieho bod. Avšak hodnota Curieho bodu je závislá na přítomnosti dalších prvků. Z **obr. 2** je patrné, že většina prvků posouvá hodnotu Curieho bodu k nižším teplotám, teplotu zvyšuje pouze železo a kobalt. Nikl patří k magneticky měkkým materiálům. V magnetickém poli dokáže měnit svoje rozměry v závislosti na stupni intenzity magnetického pole. Tomuto jevu se říká magnetostrikce a využívá se při výrobě ultrazvukových přístrojů [6].



**Obr. 2** Vliv přísad na teplotu Curieho bodu niklu [6]

### 2.1.3. Použití niklu

Výrobky obsahující nikl hrají v našem každodenním životě důležitou roli. Ve srovnání s jinými materiály mají výrobky obsahující nikl lepší odolnost proti korozi, větší houževnatost, vyšší pevnost při vysokých a nízkých teplotách a řadu speciálních magnetických a elektrotechnických vlastností. Proto se většina výroby niklu používá pro korozivzdorné oceli, legování prvků, baterií a některých dalších použití, jako jsou kuchyňské výrobky, mobilní telefony, zdravotnické vybavení, doprava, budovy, výroba elektřiny a šperků.

Z **obr. 3** je patrné, že použití niklu dominuje výroba nerezové oceli, avšak používá se i při výrobě slitin neželezných kovů, legovaných ocelí, pokovování, slévárenství a pro výrobu baterií [7, 8].



**Obr. 3** Grafické zobrazení použití niklu[7]

Do skupiny slitin železa s niklem patří nerezové oceli, nízkolegované oceli, litiny a některé speciální oceli. Výrobky se pak používají v plynových turbínách, v některých chemických zařízeních, v ražení mincí a námořní technice.

Nejrozšířenějšími neželeznými slitinami niklu jsou slitiny mědi, jako jsou monely, niklové mosazi a bronzy. Výrobky zahrnují vrtule, klikové hřídele a trupy prémiových remorkérů, rybářských lodí a jiných pracovních lodí.

Niklové povlaky se primárně týkají galvanizovaného niklu, který se používá k výrobě odolných dekorativních a technických povlaků.

Nikl je klíčovou součástí několika systémů dobíjecích baterií používaných v elektronice, elektrickém nářadí, dopravě a nouzovém napájení. Největší uplatnění má při výrobě baterií NiMH [7].

#### 2.1.4. Slitiny niklu

Nové progresivní technologie v chemickém průmyslu, ropném průmyslu, energetice, a převážně pak výkonnější letecké a raketové motory si vyžádaly vývoj nových materiálů odolávajících velmi agresivním prostředím, korozi, a zejména mechanickému namáhání za vysokých teplot [9].

Slitiny niklu se rozdělují do dvou skupin, a to na „superslitiny“ a korozivzdorné slitiny na bázi niklu. Superslitiny vynikají svojí vysokou žárovevností a žáruvzdorností. Korozivzdorné slitiny na bázi niklu mají jako základ substituční tuhý roztok niklu s přísadami dalších kovů [9].

##### 2.1.4.1. Technicky čistý nikl

Do skupin niklových slitin se řadí i komerčně čistý nikl, který má velmi dobré mechanické a antikorozi vlastnosti, ale v některých případech je cenově a dostupností méně příznivý. V současné době je možné se setkat s několika možnostmi komerčně čistého niklu. Tyto varianty obsahují malé množství ostatních prvků, které jim zlepšují jejich dané vlastnosti. V **tab. 2** jsou uvedeny některé příklady komerčně čistého niklu [10,11].

**Tab. 2** Některé varianty komerčně čistého niklu [11]

| Obchodní název | Minimální obsah Ni [hm. %] | Běžné příměsi             |
|----------------|----------------------------|---------------------------|
| Čistý nikl     | 99,99                      | -                         |
| A-Nikl         | 99,4                       | Cu, Fe, Mn, Si, C         |
| Permanickel    | 98,65                      | Cu, Fe, Mn, Si, C, Mg, Ti |
| E-Nikl         | 97,7                       | Cu, Fe, Mn, Si, C         |
| D-Nikl         | 95,2                       | Cu, Fe, Mn, Si, C         |
| Duranikl       | 93,5                       | Cu, Mn, Si, C, Al         |



#### **2.1.4.2. Superslitiny**

Ve třicátých letech dvacátého století byly vynalezeny superslitiny niklu. Tento objev umožnil výrobu vysokoteplotních komponentů, jako jsou lopatky a disky turbín v motorech pro proudová letadla a rakety. Stále se zvyšující požadavky se už netýkají pouze pevnostních a relaxačních vlastností, ale závisí také odolnosti proti náhlým teplotním změnám, na chemické odolnosti v různých agresivních prostředích a dalších mnoha technologických parametrech, do nichž se zahrnuje obrobitelnost, tvařitelnost a svařitelnost. Tato skupina slitin má také zastoupení mezi slitinami s vynikající odolností proti agresivní vlhké korozi. Slitiny obsahují zhruba 15% chromu a jsou dále legovány například Co, Ti, Al, V, Fe, W, Nb, Ta. Obsah uhlíku se pohybuje v rozmezí 0,03 - 0,18%. Ve vlhkém prostředí, například v chemickém průmyslu, jsou slitiny legovány molybdenem, což zvyšuje jejich odolnost proti hloubkové korozi. Přes to, že se niklové slitiny nevyznačují vysokými hodnotami proti creepu, jako jsou vysoké hodnoty modulu pružnosti a nízké difúzní charakteristiky, tak se používají v podmínkách dlouhodobého namáhání za vysokých teplot [5, 9].

Můžeme se setkat s dalším rozdělením těchto materiálů a to na žárovevné a žáruvzdorné slitiny.

V případě žárovevných slitin je dbán zřetel na odolnost proti mechanickému namáhání za vysokých teplot. Mezi nejznámější členy z této skupiny materiálů patří Nimonic tvořený 75% Ni, 20% Cr, 3% Ti, 0,01% C [9].

Hlavním požadavkem žáruvzdorných slitin je odolnost vůči oxidaci za vysokých teplot. Struktura těchto slitin musí být stále austenitická, což vyžaduje obsah minimálně 20% Ni. Odolnost proti tvorbě okujů zaručuje minimální obsah 16% Cr, v menší míře potom Al a Si [9].

#### **2.1.4.3. Korozivzdorné slitiny na bázi niklu**

Tyto slitiny jsou převážně austenitické struktury. Navazují na austenitické chromniklové oceli s obsahem 8-29% niklu, který ve slitinách niklu dosahuje až 80%. Obsah chromu nad 15% zajišťuje jejich pasivaci [10].

Slitiny na bázi Ni-Cr-Fe bývají modifikovány pro navýšení odolnosti vůči korozi a zlepšení ostatních vlastností dalšími prvky [10].

Slitiny Ni-Mo-Cr mají vyšší obsah molybdenu (15-30%), což má za následek zvýšení odolnosti i v redukčním prostředí. Při vyšším obsahu chromu je zaručena odolnost i v oxidačním prostředí [10].

Skupinu slitin Ni-Cu nazýváme Monelové slitiny. Je to nejstarší skupina niklových slitin používána pro velice agresivní prostředí v chemickém průmyslu, při zachování významné pevnosti. Základní slitina Monel obsahuje přibližně 67% Ni a 30% Cu, zbytek je tvořen Mn, Fe a Si. Monel se využívá všude tam, kde je požadována vysoká odolnost vůči slané vodě a účinku kyselin.

S výjimkou slitin s obsahem Al a Ti nemohou být mechanické vlastnosti zlepšovány tepelným zpracováním. Jediným způsobem jak zlepšit tyto vlastnosti je tváření za studena. U Monelů s obsahem Al a Ti může dojít k precipitaci a slitina může být tedy zpevňována tepelným zpracováním. Složitější Monely jsou odvozeny od základního typu a jsou označovány písmeny R, K, H a S [10, 11].

#### **2.1.4.4. Slitiny INCOLOY a INCONEL**

Ačkoliv slitiny INCONEL a INCOLOY patří do stejné skupiny vysoce legovaných slitin, každý z nich má své vlastní odlišné vlastnosti a sdílí další. Vysoce legované slitiny obecně poskytují vysokou odolnost proti korozi a oxidaci, stejně jako mechanickou pevnost při zvýšených teplotách. Nejzákladnější rozdíl mezi nimi spočívá v jejich složení. INCONEL, slitina niklu-chromu, obecně obsahuje více než 50% niklu, zatímco INCOLOY, slitina nikl-železo-chrom, má méně než 50% niklu.

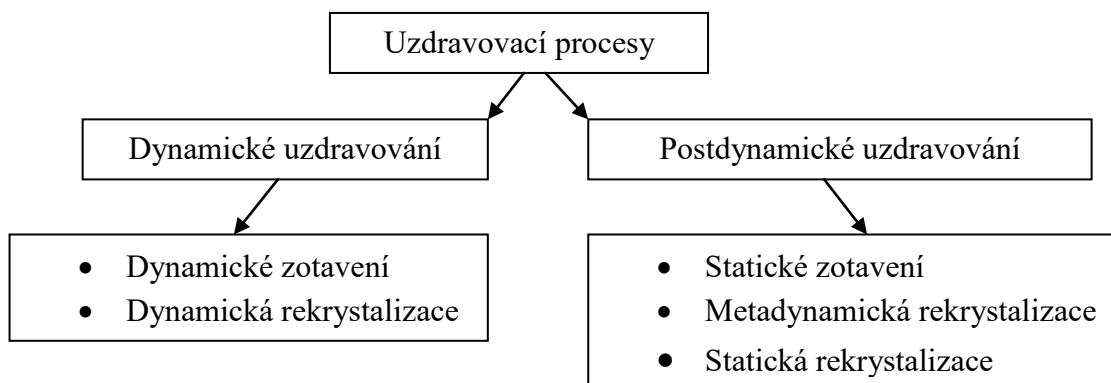
INCONEL vytváří při zahřátí silnou, avšak stabilní oxidovou vrstvu, která chrání její vnější povrch před dalším napadením. Díky tomu je ideální volbou pro aplikace s extrémními teplotami a tlaky, kde by ocel a hliník podléhaly tepelnému tečení. Slitiny INCONEL jsou k dispozici v mnoha třídách, které se liší pouze ve svém chemickém složení. Ve své základní formě by typické aplikace zahrnovaly potravinářský průmysl a komponenty tepelného zpracování. Při legování jinými prvky však další zpevnění, které umožňuje jeho použití v náročnějších oblastech námořního, leteckého a chemického průmyslu. INCONEL, který je přizpůsoben svému špičkovému výkonu, se pak stává materiálem výběru v nejkritičtějších prostředích lopatek turbín, raketových motorů a klíčových komponent jaderného průmyslu.

INCOLOY, s vyšším obsahem železa a odpovídajícími nižšími náklady, z něj činí ideální materiál ve zvýšených teplotách, ale méně kritických aplikacích. Dalším znakem je relativní snadnost výroby, přičemž se používají stejné stroje a postupy používané pro

nerezovou ocel. Existuje také více typů této slitiny, jejichž důraz je kladen spíše na odolnost vůči agresivním formám koroze, zejména ve vodním prostředí. Zatímco základní forma INCOLOY najde široké obecné použití, další legování poskytuje zvýšenou odolnost proti chemické a environmentální korozi, jakož i fyzikálnímu poškození, jako je povrchová jamka a praskání. Vynikající odolnost vůči mořské vodě, slané vodě, kyselinám a kyselinám s vysokým obsahem chloru z něj činí populární volbu v ropném a plynárenském průmyslu. Nejvíce specializované slitiny Incoloy jsou však široce používány ve všech nejděsnějších chemických prostředích, mimo jiné včetně kyselin, jaderného paliva a reaktivních atmosfér pecí[12].

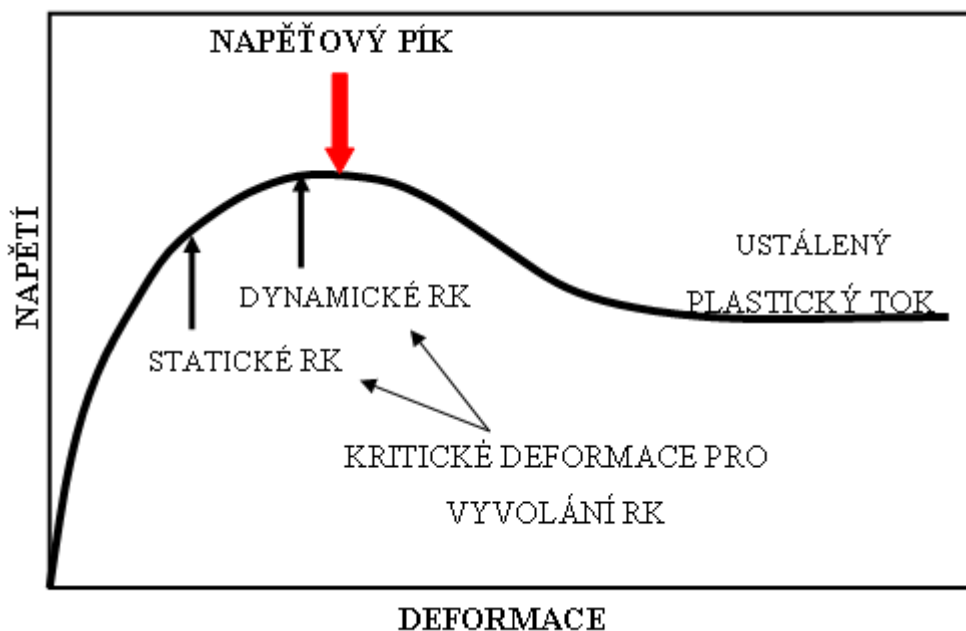
## **2.2. Uzdravovací procesy**

Obecně dochází při plastické deformaci ke zpevňování tvářeného materiálu, samotný materiál má samozřejmě snahu v něm snížit nahromaděnou vnitřní energii, pokud možno na původní velikost. To probíhá přes uzdravovací procesy. Hlavním projevem těchto procesů je snížení hustoty dislokací. Materiály, které se tváří za studena jsou odpevňovány tepelným zpracováním, zatímco v materiálech zpracovávaných za tepla to probíhá právě přes uzdravovací procesy, které probíhají přímo během procesu tváření či bezprostředně po něm. Tyto uzdravovací procesy rozdělujeme z časového hlediska na dynamické a postdynamické. Uzdravovací proces, který probíhá během vlastní deformace, se nazývá dynamické uzdravování. Uzdravování postdynamické se uskutečňuje až po skončení deformace. Uzdravovací procesy lze dále rozdělit podle typu jejich mikrostrukturních změn na zotavení a rekrytalizaci. Při rekrytalizaci vznikají zcela nová zrna stejné fáze, a to především nukleací zárodků a jejich dalším růstem. Zatímco při druhém typu uzdravovacího procesu, tedy zotavení se snižuje hustota dislokací například jejich anihilací, tím dochází ke vzniku subzrn za pomoci přeskupování dislokací. Rozdělení uzdravovacích procesů je uvedeno na **obr. 4** [13,14].



**Obr. 4** Rozdělení uzdravovacích procesů [14]

Podmínkou pro zahájení dynamické rekrytalizace je dosažení určité hodnoty kritické deformace. Z **obr. 5** je patrné, že pro vyvolání statické rekrytalizace je velikost kritické deformace menší než pro vyvolání rekrytalizace dynamické, nicméně kritická deformace pro zahájení dynamické rekrytalizace je menší, než deformace pro dosažení píku. Na **obr. 5** je napěťová křivka, ze které lze také vypočítat jak efektivní je rekrytalizace při změkčování tvářeného materiálu. Po zdolání napěťového píku, dochází při průběhu dynamické rekrytalizace k dočasnému snížení deformačního odporu [13, 14].



**Obr. 5** Charakteristické body napěťové křivky a deformace nutné pro vyvolání rekrytalizace [15]

### 2.2.1. Dynamické uzdravování

Při obvyklých procesech tváření za tepla (se sérií mnoha nevelkých úběrů střídajících se s prodlevami, při nichž je možné, aby v materiálu docházelo k uzdravování) proto převažuje statická rekrytalizace. Tvar spojitě napěťové křivky závisí na typu probíhajících uzdravovacích procesů a také na termomechanických podmínkách tváření. Ty jsou souhrnně definovány Zenerovým-Hollomonovým parametrem  $Z[s^{-1}]$  [13, 14]:

$$Z = \dot{\epsilon} \cdot \exp\left(\frac{Q}{R \cdot T}\right) \quad (1)$$

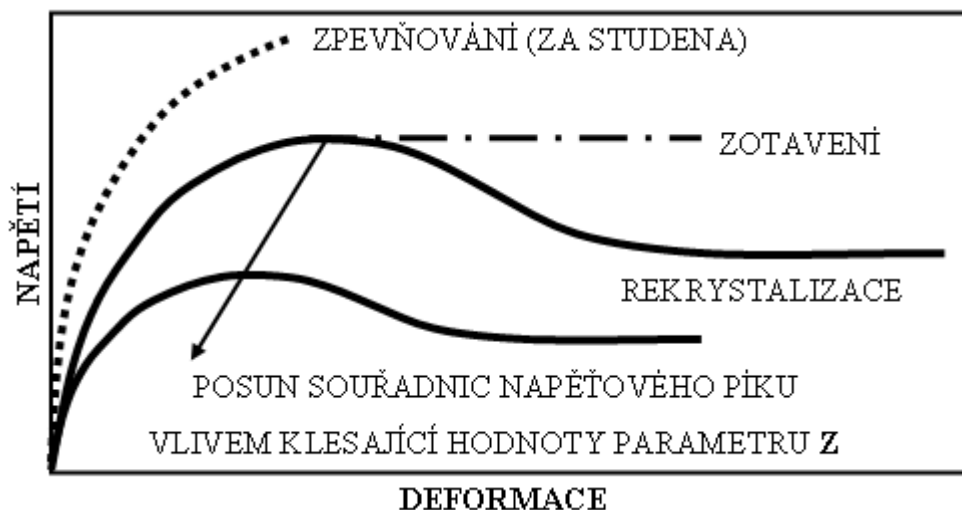
Kde  $T$  je teplota deformace udávána v [K], molární plynová konstanta značena  $R$  [ $8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ] a deformační rychlost  $\dot{\epsilon}$  udávána v [ $s^{-1}$ ]. Materiálový faktor do parametru  $Z$  přináší veličina aktivační energie  $Q$  [ $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ ]. Aktivační energie je velice důležitá materiálová konstanta sloužící k predikci počátku dynamické rekrytalizace a k matematickému popisu křivek napětí-deformace. Pro určení velikosti aktivační energie je možno použít upravený vztah Sellarse a Tegarta [26]:

$$\dot{\epsilon} = C \cdot \exp\left[-\frac{Q}{R \cdot T}\right] \cdot [\sinh(\alpha \cdot \sigma_{max})]^n \quad (2)$$

Kde  $\dot{\epsilon}$  je deformační rychlost [ $s^{-1}$ ],  $C$ ,  $\alpha$  [MPa] a  $n$  [-] jsou materiálové konstanty,  $R$  je molární plynová konstanta [ $8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ], teplota deformace  $T$  [K] a maximální deformační odpor  $\sigma_{max}$  [MPa], který se shoduje s píkovým napětím. Tato rovnice vypadá na první pohled velmi složitě, ale jejím řešením pomocí částečných lineárních regresí s následnou nelineární regresí je možné stanovit veličiny, jako je aktivační energie a konstanty  $C$  [ $s^{-1}$ ],  $\alpha$  [MPa] a  $n$  [-] [13, 14].

Napěťové křivky budou tvarově i kvantitativně stejné, pouze pokud kombinace teploty a rychlosti deformace pro daný materiál dají stejnou velikost parametru  $Z$ . I proto je Zenerův-Hollomonův parametr popisován jako teplotně kompenzovaná deformační rychlost. Čím vyšší je hodnota parametru  $Z$ , tím vyšší budou hodnoty deformace napěťového píku i vyšší napětí, což znamená, že dojde k oddálení dynamické rekrytalizace a ke zvýšení deformačního odporu materiálu. To je zobrazeno na **obr. 6**, kde jsou znázorněny i další zajímavé informace [13, 14].





**Obr. 6** Vliv uzdravovacích procesů na napěťovou křivku [14]

Na první pohled lze rozpoznat vliv různých dějů na tvar napěťové křivky. Tvar příslušné křivky pro složitý účinek dynamické rekrytalizace je ve stoupající části dán zpevňováním, při překročení napěťového píku prozatím dynamická rekrytalizace převládne nad probíhajícím zpevňováním, při velmi vysokých deformacích se hodnota deformačního odporu s deformací v podstatě nemění a dojde k vyrovnání zpevňování a uzdravování a k takzvanému ustálenému plastickému toku. Pokud působí při tváření za studena pouze zpevňování, křivka napětí-deformace až do vyčerpání plasticity materiálu roste. Při dynamickém zotavení se materiál neuzdravuje tak účinně jako při rekrytalizaci a při překročení kritické deformace nenastane pokles deformačního odporu, ale ihned dojde k ustálení plastického toku. Důležitou schopností je odhad velikosti deformace do píku  $e_p$ , která souvisí se zahájením dynamické rekrytalizace, ale naprosto přesně s hodnotou maximálního deformačního odporu materiálu  $\sigma_{max}$  [MPa] za určité teploty a deformační rychlosti. S pomocí Zenerova-Hollomonova parametru je možné hodnoty souřadnic napěťového píku stanovit podle následujících vztahů [13, 14].

$$e_p = U \cdot Z^W \quad (3)$$

$$\sigma_{max} = \frac{1}{\alpha} \cdot \operatorname{argsinh}^n \sqrt{\frac{Z}{C}} \quad (4)$$

### 2.2.1.1. Dynamická rekrytalizace

Dynamická rekrytalizace je odpevňovací děj, který nejčastěji probíhá při válcování tyčí a drátů za tepla na spojitých válcovacích tratích. Je to nejdůležitější mechanismus změkčování u slitin a kovů, které se projevují nízkou energií vrstevných chyb s nepropustným dislokačním sít'ovím. Při tomto procesu změkčování vznikají nukleační zárodky nových zrn stejné fáze, které dále rostou. Tímto mechanismem dojde k odstranění zpevnění materiálu a zlepšení jeho plastických vlastností. Zárodky nových zrn se tvoří koalescencí subzrn. Výhodnými místy pro vznik zárodků jsou většinou hranice zrn a deformační pásy, které se projevují vyšší energií mřížky. Pro tvorbu zárodků rekrytalizace mohou posloužit i cizí částice jako například hrubozrnné nerozpuštěné precipitáty. Velikost deformace je často používána pro popis kinetiky dynamické rekrytalizace namísto času. Velikost zrna a velikost deformace před deformací nemají žádný vliv na velikost dynamicky rekrytalizovaného zrna, což ovlivňuje interakce teploty deformace a deformační rychlosti, která může být vyjádřena Zener-Hollomonovým parametrem. Velikost zrna po dynamické rekrytalizaci může být vyjádřena následujícím vztahem [13, 14].

$$D_{DRX} = B \cdot Z^r \quad (5)$$

Kde  $B$  a  $r$  [-] jsou koeficienty charakterizující příslušný materiál.

### 2.3. Aktivační energie při tváření za tepla

Aktivační energie  $Q$  [ $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ ] je velice významná materiálová konstanta, která závisí především na mikrostruktuře a chemickém složení tvářeného tělesa. Hodnoty, které se získávají z plastometrických zkoušek tlakem a krutem, slouží k výpočtu této konstanty. Tato konstanta pak slouží například k výpočtu Zener-Hollomona parametru (teplotně kompenzované rychlosti). Mimo jiné, je také pomocí znalosti této konstanty možné efektivně předpovídat souřadnice napět'ového píku (maximální deformační odpor), což souvisí se začátkem dynamické rekrytalizace při dané rychlosti deformace  $\dot{\epsilon}$  [ $\text{s}^{-1}$ ] a teplotě  $T$  [K]. Při určování hodnoty  $Q$  se často vychází z upravené rovnice Sellarse a Tegarta (2) [15].

Původně byl tento vztah vytvořen pro matematický popis deformační rychlosti odpovídající ustálenému stavu napětí  $\sigma_{ss}$ , proto je případně možné použít pro výpočet aktivační energie oboje hodnoty jak  $\sigma_{ss}$  tak i  $\sigma_{max}$ . Jelikož jsou hodnoty  $\sigma_{ss}$  velmi těžce získatelné v širokém intervalu deformační rychlosti a teploty, tak se mnohem častěji využívá hodnota maximálního napětí

$\sigma_{max}$ . V rovnici (18) spočívá princip posuzování konstant ve využití speciálních charakteristik funkce hyperbolický sinus a předpokládáme, že pro nízké hodnoty deformačních odporů, což znamená při vysokých teplotách, lze zjednodušit tuto rovnici do formy Arrheniovy mocninné závislosti [15].

$$\dot{\epsilon} = C_1 \cdot \exp\left[\frac{-Q}{R \cdot T}\right] \cdot \sigma_{max}^n \quad (6)$$

A naopak pro nízké hodnoty teplot a vysoké hodnoty napětí lze rovnici (18) upravit do následujícího vztahu [15].

$$\dot{\epsilon} = C_2 \cdot \exp\left[\frac{-Q}{R \cdot T}\right] \cdot \exp(\beta \cdot \sigma_{max}) \quad (7)$$

Kde  $C_1$ ,  $C_2$  a  $\beta$  jsou materiálové konstanty. Konstanta  $\alpha$  je dána nadcházejícím vztahem (8) [15].

$$\alpha = \frac{\beta}{n} \quad (8)$$

Výše uvedené rovnice je možné vyřešit grafickou metodou za pomoci vícenásobných lineárních regresních analýz. Při nízké hodnotě napětí, pro zvolenou vysokou teplotu se konstanta  $n$  stanovuje pomocí lineární regrese z experimentálně určených bodů v souřadnicích  $\ln \sigma_{max} \sim \ln \dot{\epsilon}$ . A naopak pro vysokou hodnotu napětí, při nízké teplotě se konstanta  $\beta$  určuje lineární regrese v souřadnicích  $\sigma_{max} \sim \ln \dot{\epsilon}$ . Konstanty  $Q$  a  $C$  z rovnice (6) je možné dopočítat následně po výpočtu hodnoty  $\alpha$  podle rovnice (8). Materiálové konstanty  $Q$  a  $C$  dopočítáme pomocí konečné lineární regrese všech údajů vynesných v souřadnicovém systému

$T^{-1} \sim (\ln \dot{\epsilon} - n \cdot \sinh(\alpha \cdot \sigma_{max}))$ . Odhad konstant  $n$  a  $\beta$  je velmi slabou stránkou charakterizované metody, jelikož může být silně usměrněna rozptylem experimentálních dat a volbou odpovídajícího stupně teploty. Nedokonalost této metody byla eliminována použitím speciálně navrženého softwaru ENERGY 4.0, který poskytuje možnost odstranění bodů vykazujících enormní odchylku od trendů stanovených grafickým způsobem. Hodnoty  $n$  a  $\beta$ , které se stanovily pomocí výše uvedeného postupu, využívá software ENERGY 4.0 pouze jako první odhad parametrů pro finální rafinaci pomocí nelineární regrese veškerých údajů odpovídajících rovnici (2) [15].

## 2.4. Deformační odpory

### 2.4.1. Definice deformačního odporu

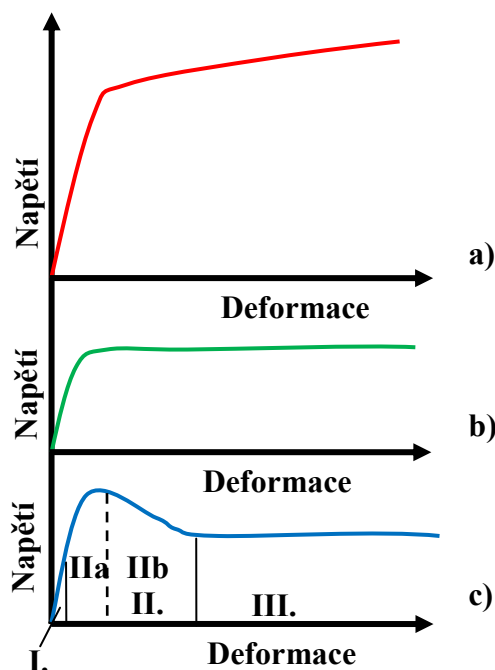
Deformační odpor je fyzikální veličina, která představuje vnitřní napětí vznikající v deformovaném materiálu jako odpor proti působení vnějších tvářecích sil. Deformovaný materiál se tímto brání proti změně tvaru. Vyvoláním dostatečně velikého napětí je pak způsoben vznik plastické (trvalé) deformace v tvářeném tělese. V závislosti na termomechanických podmínkách, mezi které patří teplota, deformace, deformační rychlost, historie a velikost deformace, se velikost deformačního odporu v průběhu deformace mění, jako například velikosti momentů a tvářecích sil. Proto je velmi důležitá informovanost o průběhu deformačního odporu za daných podmínek tváření. Tyto hodnoty jsou velmi důležité pro konstruktéry, projektanty na provozech tažení, válcoven či kování [13, 17].

V praxi se při určování skutečných deformačních odporů vychází z hodnot přirozeného deformačního odporu, prezentující materiálový popis. Přirozený deformační odpor materiálu je určován při jednoosém stavu napjatosti, kam spadá například tlaková zkouška nebo tahová zkouška do vzniku krčku.

Ke grafickému zobrazení průběhu deformačního odporu v závislosti na deformaci tvářeného tělesa, za daných teplot a deformačních rychlostí, slouží napěťové křivky (křivky napětí-deformace). Hodnoty pro sestavení těchto závislostí, pro daný tvářený materiál se získávají plastometrickými zkouškami. Nejpoužívanějšími zkouškami pro získání potřebných dat k sestavení napěťových křivek jsou zejména zkoušky krutem a jednoosým tlakem [17].

### 2.4.2. Typy křivek napětí-deformace

Deformačními křivkami se myslí průběh závislosti deformačního napětí na velikosti deformace za konstantní deformační rychlosti a teplotě. Na **obr. 7** jsou znázorněny tři typy deformačních křivek. Křivka **a** na **obr. 7** zobrazuje deformaci za studena, další křivka **b** zachycuje dokonalé podmínky deformace za tepla při ustálené hodnotě napětí nezávisle na deformaci. Poslední křivka **c** z **obr. 7** znázorňuje průběh skutečných podmínek deformace za tepla. Po oblasti pružné deformace dochází nejprve ke zpevňování až po získání maximálního napětí, následně převládá změkčování, při kterém deformační napětí klesá na minimální hodnotu [16].



**Obr. 7** Grafické zobrazení závislosti deformačního odporu na velikosti deformace [16]

a) deformace za studena

b) ideální deformace za tepla

c) deformace za tepla s uplatněním dynamických uzdravovacích procesů

Deformační křivku **c** z **obr. 7** je možno rozdělit do tří oblastí. I. oblast pružné deformace, oblast II. je oblast neustáleného plastického toku a III. oblast ustáleného plastického toku. Pro podmínky tváření je nejdůležitější oblast neustáleného plastického toku, kterou dále rozdělujeme na dvě části. IIa je fáze zpevňování a IIb fáze změkčování. Jakmile je přesáhnuta kritická hodnota deformace a maximálního napětí, tak začne probíhat proces změkčování a to buď dynamickou rekrytalizací, nebo dynamickým zotavením. V oblasti II se z kinetického postojů jedná o nerovnovážnou rychlost zpevňování a změkčování až do chvíle jejich vyrovnání, čímž nastane v oblasti III ustálený plastický tok [16].



### 2.4.3. Deformační chování materiálu za studena

Tváření materiálů za studena probíhá bez přehřevu, tedy pod teplotou rekystalizace. Dochází pouze k difúzi intersticiálně rozpuštěných prvků, což vede k intenzivnímu zpevňování materiálů a velmi vysokým hodnotám deformačních odporů. Vlivem vnějších sil vzniká současně malá elastická a velká plastická deformace. Na tvařitelnost za studena má vliv chemické složení, výchozí struktura materiálu, podmínky tváření (tření, stav napjatosti) a předešlý výrobní proces. Dobrá tvařitelnost je podmíněna vysokými plastickými a nízkými pevnostními vlastnostmi výchozího materiálu [14].

Tváření za studena probíhá dvěma základními mechanismy a to mechanismem kluzovým nebo dvojčatěním. Převažující je kluzový mechanismus, kde musí být pro zajištění dobré tvařitelnosti minimálně 5 nezávislých kluzových systémů.

Mechanismus plastické deformace dvojčatěním je zvláštní druh kluzového mechanismu, který probíhá prakticky pouze při vysokých deformačních rychlostech. Deformace je doprovázena zvyšováním koncentrace mřížkových poruch (vakance, dislokace, mikrotrhliny) [14].

### 2.4.4. Matematický popis křivek napětí-deformace za studena

Při tváření materiálu za studena je velmi důležité si pohlídat působení kumulace zpevnění, ale naopak se zanedbává vliv rychlosti deformace i teploty. Pro matematický popis napěťové křivky byly představeny některé rovnice, často obsahující výrazné meze kluzu  $\sigma_y$  [MPa] [17,18]:

$$\sigma_p = K_H \cdot e^{n_H} \quad (\text{podle Hollomona}) \quad (9)$$

$$\sigma_p = \sigma_y + K_L \cdot e^{n_L} \quad (\text{podle Ludwika}) \quad (10)$$

$$\sigma_p = K_S \cdot (e + B_S)^{n_S} \quad (\text{podle Swifta}) \quad (11)$$

$$\sigma_p = K_R (B_R + e)^{n_R} - C_R \quad (\text{podle Raisnera}) \quad (12)$$

Kde  $\sigma$  je napětí [MPa],  $e$  je skutečná (logaritmická) deformace,  $K$ ,  $n$ ,  $B$  a  $C$  jsou materiálové konstanty, které se v různých typech vzorců liší [14, 18].

### 2.4.5. Matematický popis křivek napětí-deformace za tepla

Často využívaný a tedy i nejvýznamnější charakteristický bod na napět'ové křivce je takzvaný napět'ový pík, který reprezentuje maximální deformační odpor, jakého může zkoumaný materiál dosáhnout. Překonání napět'ového píku vede k poklesu deformačního odporu, což je zapříčiněno převahou probíhajících uzdravovacích procesů nad zpevňovacími procesy. Pro usnadnění je napět'ový pík často spojován se zahájením průběhu dynamické rekrytalizace. Napět'ový pík je určen dvěma souřadnicemi a to deformací do píku  $e_p$  [-] a napětím odpovídající píku  $\sigma_p$  [MPa]. Z **obr. 5** v kapitole 2.2 je patrné, kde se napět'ový pík nachází [16].

Při tváření za tepla při velkých deformacích může být složitá predikce přirozeného deformačního odporu a to z důvodu, že ve tvářeném tělese probíhají dynamické uzdravovací procesy. Při tváření za tepla v oblasti zpevňování je schopen popsat křivku napětí-deformace pouze následující model [14]:

$$\sigma_p = e^{m_1} \cdot \dot{e}^{m_2} \cdot \exp(-m_3 \cdot T) \quad (13)$$

Kde  $e$  je velikost deformace [-],  $\dot{e}$  je deformační rychlost [ $s^{-1}$ ],  $m_1$ ,  $m_2$  a  $m_3$  jsou materiálové konstanty [-] a  $T$  je teplota deformace [K].

#### 2.4.5.1. Model Sellars

Pro popis deformačního odporu za tepla je model Sellars jeden z nejpoužívanějších, vychází z funkce hyperbolického sinu. Následující vztah vyjadřuje jeho nejpoužívanější formu, která je vyjádřena jako inverzní funkce hyperbolického sinu [19].

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left[ \left( \frac{Z}{A} \right)^{\frac{1}{n}} + \sqrt{\left( \frac{Z}{A} \right)^{\frac{2}{n}} + 1} \right] \quad (14)$$

Pro popis celé napět'ové křivky slouží vztah (12). Jiné modely popisují většinou pouze jednu část křivky, a to buď před nebo za píkem. Avšak tento model má několik nevýhod, jednou z nich je, že nezapočítává historii tváření, což může způsobovat problémy, pokud při procesu tváření hrají důležitou roli uzdravovací procesy. Další nevýhoda je, že ztrácí svou přesnost, jestliže napět'ové křivky mají velmi ostrý napět'ový pík. Nevýhoda tohoto modelu je také to, že nebere v úvahu účinek deformace. Přičemž deformace má velký vliv na

deformační odpor, zejména v počáteční fázi tvářecího procesu. Z tohoto důvodu byl navržen upravený vztah, který obsahuje kromě vlivu deformační rychlosti a teploty, také vliv deformace. Tento model lze formulovat následovně [19, 20].

$$\sigma = \frac{\beta_0}{\alpha} \cdot e^{\beta_1} \cdot \exp(-\beta_2 \cdot e) \cdot \ln \left[ \left( \frac{Z}{A} \right)^{\frac{1}{n}} + \sqrt{\left( \frac{Z}{A} \right)^{\frac{2}{n}} + 1} \right] \quad (15)$$

Kde  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  a  $\beta_2$  jsou materiálové konstanty, které lze získat na základě nelineární regresní analýzy naměřených dat [21].

#### 2.4.5.2. Model Fields-Backofen

Původní model Fields-Backofen byl uspořádaný tak, aby pro určení deformačního odporu za studena započítával vliv deformační rychlosti a deformace [20].

$$\sigma = C \cdot e^n \cdot \dot{\epsilon}^m \quad (16)$$

Deformační odpor při tváření za tepla není závislý pouze na deformační rychlosti a deformaci, ale také na teplotě. Navíc bylo zjištěno, že teplota ovlivňuje deformační odpor daleko víc než deformační rychlost. Proto byly vyvinuty modely, které obsahují i vliv teploty. Avšak mnoho vytvořených modelů popisují pouze deformační zpevnění. Jak je známo, tak během tváření za tepla nastává proces odpevnění materiálu. Aby bylo možné popsat i tento proces, byl navržen nový model, který vychází z původního modelu Fields-Backofen. Tento model obsahuje odpevňovací člen  $s$  a proměnné hodnoty  $n$  a  $m$ , což udává následující vztah [22].

$$\sigma = C \cdot e^n \cdot \dot{\epsilon}^m \cdot \exp(b \cdot T + s \cdot e) \quad (17)$$

Kde  $n$  je koeficient deformačního zpevnění,  $m$  představuje index citlivosti deformační rychlosti,  $C$  a  $b$  jsou konstanty a  $s$  je exponent udávající vliv odpevnění. Hodnoty  $n$  a  $m$  v tomto případě nejsou konstanty, ale jsou pokládány za proměnné závislé na deformačních podmínkách [23].

### 2.4.5.3. Model Mirzadeh a Najafizadeh

Mirzadeh a Najafizadeh vyvinuli vlastní model pro predikci deformačního odporu a to z důvodu vyšší přesnosti a snížení časové náročnosti výpočtu. Tento model lze vyjádřit následovně [23].

$$\frac{\sigma}{\sigma_p} = a + b \cdot \left(\frac{e}{e_p}\right)^{0,4} + c \cdot \left(\frac{e}{e_p}\right)^{0,8} + d \cdot \left(\frac{e}{e_p}\right)^{1,2} \quad (18)$$

Tento vztah byl vytvořen na základě metody nejmenších čtverců a statistické metody F-test. Výhodou této rovnice je, že konstanty, které jsou určovány pomocí nelineární regrese z experimentálních dat, nejsou závislé na deformačních podmínkách [23].

### 2.4.5.4. Ostatní používané modely

Je patrné, že zcela ideální model pro předpověď deformačního odporu pro všechny druhy deformačních podmínek a materiálů neexistuje. Pro predikci deformačního odporu lze také použít model (19), který dělí výpočet na dvě části. Následující model očekává rozdělení materiálu na tři části, a to konkrétně zrekrytalizovanou zónu, dále zónu, ve které se uskutečňuje pouze zpevňování materiálu a poslední přechodovou zónu, kterou je možné díky malé velikosti zanedbat [24,25].

$$\begin{aligned} \sigma = & \sigma_{uns} \cdot \left[ 1 - \frac{2}{1 + B_{un0} \cdot \exp(F_{un} \cdot \sigma_{uns}^2 \cdot t)} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot (1 - X) \\ & + \int_0^X \sigma_{res} \cdot \left\{ 1 - \frac{2}{1 + B_{re0} \cdot \exp \left[ F_{re} \cdot \sigma_{res}^2 \cdot \frac{k_1 \cdot z^{n_1}}{\dot{e}} \cdot \left( \frac{\ln(1-x)}{k} \right)^{\frac{1}{n}} \right]} \right\}^{\frac{1}{2}} dx \end{aligned} \quad (19)$$

Vztah mezi deformací, teplotou a deformační rychlostí potom uvádí následující vztah (20) [24,25].

$$\sigma = \exp(a_1 \cdot T + a_2) \cdot \left(\frac{\dot{e}}{a_7}\right)^{a_3 \cdot T + a_4} \cdot \left[ a_6 \cdot \left(\frac{e}{a_8}\right)^{a_5} - (a_6 - 1) \cdot \frac{e}{a_8} \right] \quad (20)$$

Kde se konstanty  $a_1$  až  $a_8$  určují pomocí regresní analýzy ze získaných dat [24,25].

#### 2.4.6. Deformační odpory vybraných niklových slitin

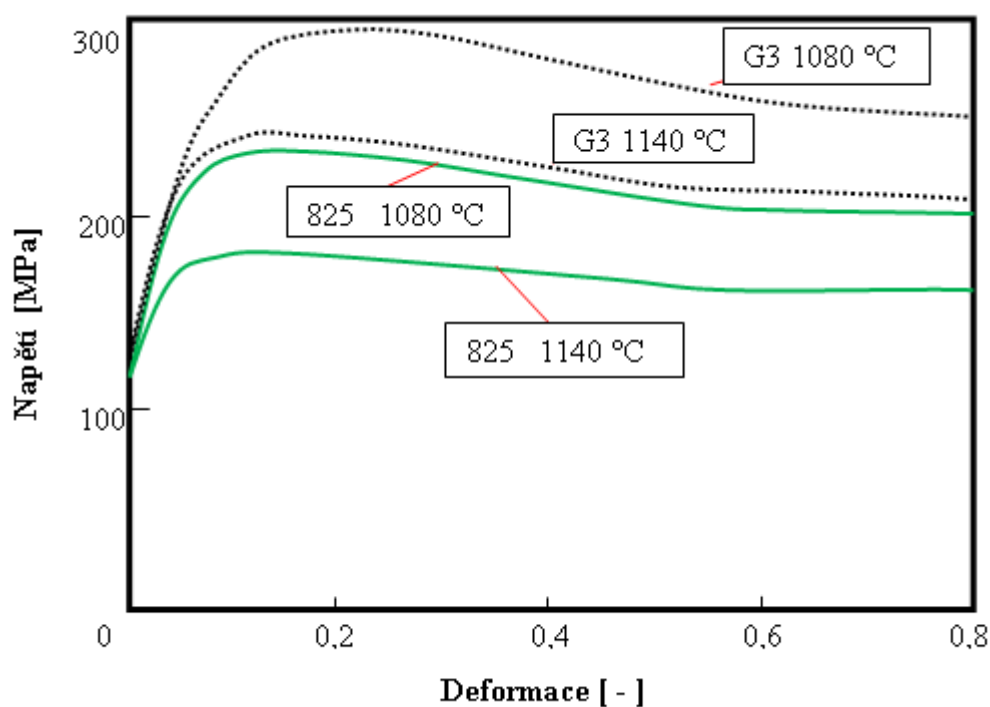
V **tab. 3** je uvedeno chemické složení čtyř velmi podobných niklových slitin s výbornou kombinací mechanických vlastností a korozní odolnosti. Tyto slitiny mohou být používány v prostředí, které může dosahovat vysokých teplot a kyselosti [25].

**Tab. 3** Chemické složení vybraných niklových slitin v hmotnostních% [26, 27]

| Slitina     | Ni     | Cr     | Mo    | W    | Mn   | C     | Cu   | S     | P      | Nb  | Ti   |
|-------------|--------|--------|-------|------|------|-------|------|-------|--------|-----|------|
| <b>G3</b>   | 46, 51 | 24, 71 | 8, 88 | 1,15 | 0,51 | 0,012 | 1,72 | 0,002 | <0,005 | 0,1 | -    |
| <b>G3-Z</b> | 46,53  | 24,05  | 6,89  | 1,09 | 0,59 | 0,014 | 1,7  | 0,003 | 0,005  | 0,1 | -    |
| <b>825</b>  | 43,77  | 22,1   | 3,24  | -    | 0,53 | 0,006 | 1,9  | 0,003 | <0,005 | -   | 0,86 |
| <b>825A</b> | 40,18  | 22     | 2,5   | -    | 0,7  | 0,007 | 1,6  | -     | <0,005 | -   | 0,8  |

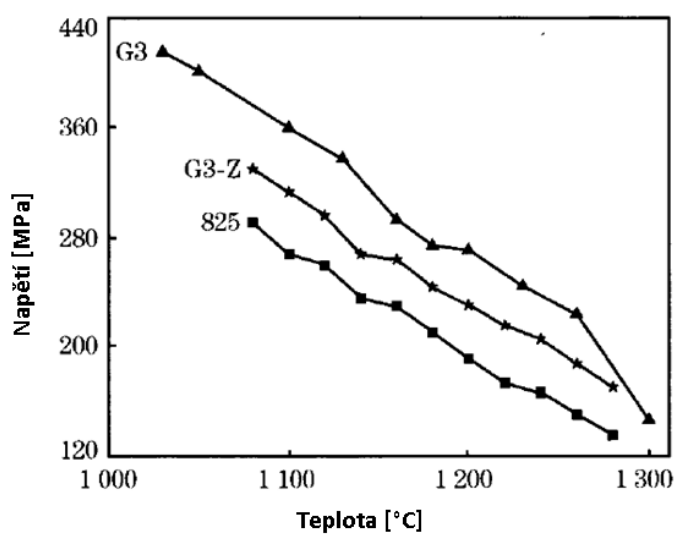
Na základě práce jiných autorů jsou na **obr. 8** znázorněny napětíové křivky slitin G3 a INCOLOY 825, které byly získány pomocí testů jednoosým tlakem.

Z **obr. 8** lze pozorovat, že dle předpokladů se maximální hodnoty napětí klesají se zvyšující se teplotou. Slitiny G3 a INCOLOY 825 mají stále velký deformační odpor i za vysokých teplot [26].



**Obr. 8** Napěťové křivky slitin G3 a INCOLOY 825[26]

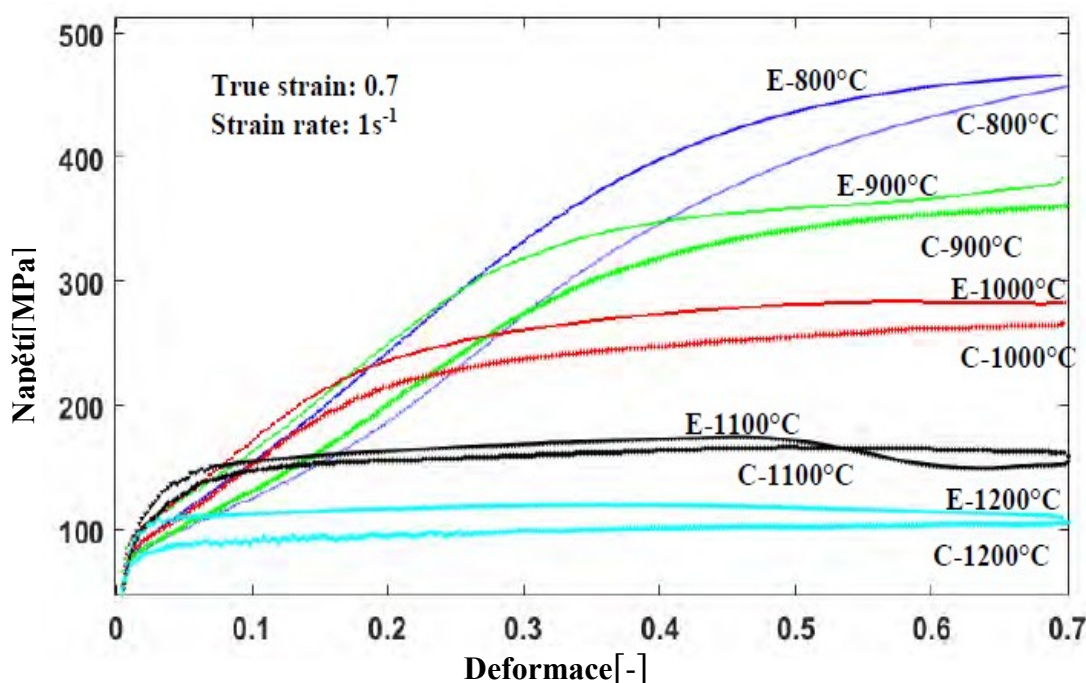
Na **obr. 9** jsou zaznamenány maximální hodnoty deformačních odporů u slitin G3, G3-Z a INCOLOY 825 při různých teplotách. Při porovnání hodnot napětí za stejných teplot, vykazuje nejvyšší hodnotu přirozeného deformačního odporu slitina G3. Naopak nejnižší hodnotu napětí zaznamenala slitina INCOLOY 825 [26].



**Obr. 9** Vztah mezi maximálním napětím a teplotou[26]

Z porovnání slitin je zřejmé, že deformační odpory slitin G3 a G3-Z jsou vyšší než u slitiny 825. Hlavním důvodem je vyšší obsah legujících prvků Cr, Mo a W v slitinách G3 a G3-Z, což jsou prvky zvyšující precipitační zpevňování a deformační odpor. Nicméně slitina 825 má lepší plasticitu než slitina G3 [26].

V další práci jiných autorů byla pro experiment použita slitina 825A jejíž chemické složení je uvedeno v **tab. 3**. Tato slitina byla testována na termomechanickém simulátoru. Tlakové testy za tepla byly provedeny na dvou typech vzorků, na vzorcích se strukturou kolumnárních krystalů a strukturou s rovnoosými zrny. Na **obr. 10** jsou uvedeny napětíové křivky vytvořeny na základě získaných dat z tlakových testů. Testy probíhaly v rozmezí teplot od 800 °C až 1200 °C do deformace 0,7 a deformační rychlosti  $1 \text{ s}^{-1}$ , kde byl oproti předchozímu experimentu volen jednotný předehřev vzorků [27].



**Obr. 10** Napětíové křivky slitiny 825A. E- rovnoosé zrno a C- kolumnární krystal [27]

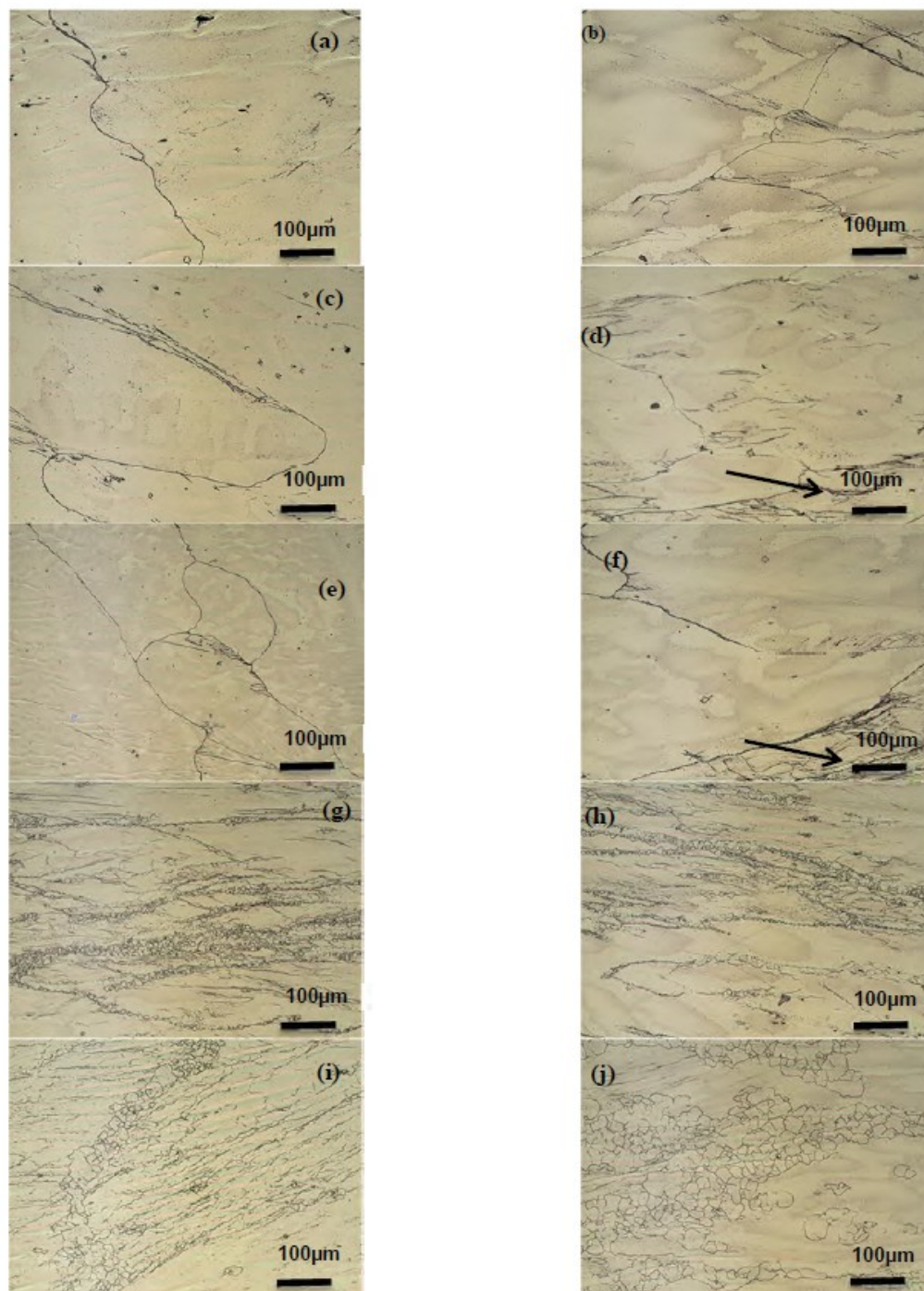
Na základě dosažených výsledků byl učiněn závěr, že se v uvedených strukturách při zvýšené teplotě deformace a konstantní rychlosti deformace  $1 \text{ s}^{-1}$  pro konkrétní deformaci 0,7 snižuje napětí a mikrotvrdost [27].

Skutečné napětí a tvrdost podle Vickerse byla u struktury s kolumnárními krystalami o 0,8 respektive 0,2 nižší než pro rovnoosou strukturu při daných teplotách deformace. Nicméně tvary napětíových křivek jsou pro oba typy struktur velice podobné [27].

Dalším účelem této studie bylo charakterizovat deformovanou strukturu. Mikrostrukturní charakterizace deformovaných vzorků byla provedena pomocí LOM a EBSD metody. Důraz byl především kladen na vývoj dynamicky rekrystalizované mikrostruktury. Na **obr. 11** jsou znázorněny deformované kolumnární a rovnoosé mikrostruktury při daných podmínkách tváření.

Při nízkých teplotách deformace, jako je 800 ° C, 900 ° C a 1000 ° C, nedošlo k žádné rekrystalizaci v celkové mikrostruktuře deformovaných vzorků v obou strukturách, jak je vidět na **obr. 11 (a) - (f)**. Malá frakce rekrystalizace však byla pozorována na některých hranicích zrna rovnoosé struktury, jak je znázorněno šipkami na mikrofotografiích **obr. 11(d)** a **(f)**. Při vyšších teplotách deformace 1100 ° C - 1200 ° C **obr. 11 (g) - (j)** došlo pouze k částečné rekrystalizaci. K tomu dochází díky struktuře, kde se tvoří řetízky jemných zrn na hranicích původních zrn v obou strukturách a rekrystalizovaných zrn vytvořených na hranicích původních zrn [27].





**Obr. 11** Vlevo: deformovaná mikrostruktura s kolumnárnými krystaly. Vpravo: deformovaná rovnoosá mikrostruktura. Teploty deformace: (a), (b) 800 °C; (c), (d) 900 °C; (e), (f) 1000°C; (g), (h) 1100°C; (i), (j) 1200 °C [27].

### **3. Cíle práce**

Hlavním cílem této diplomové práce je určit hodnoty přirozeného deformačního odporu slitiny INCOLOY 825 a to na základě plastometrických zkoušek jednoosým tlakem na plastometru Gleeble 3800.

Z takto získaných dat stanovit s využitím softwaru ENERGY 4.0 hodnotu aktivační energie při tváření za tepla dané slitiny a predikovat souřadnice odpovídající napět'ovému píku, z kterých je možné následně sestavit prostorové 3D mapy maximálního deformačního odporu a deformace odpovídající napět'ovému píku v závislosti na teplotě a rychlosti deformace. Následně se pokusit o sestavení matematických modelů pro popis přirozeného deformačního odporu za tepla zkoumané slitiny v širokém rozsahu deformací, deformačních rychlostí a teplot.

Pro matematický popis přirozeného deformačního odporu slitiny INCOLOY 825 bude využito dvou modelů, a to konkrétně model Hensel – Spittel a model Schindler aj., přičemž oba tyto modely jsou založeny na různých základech. K vyčíslení konstant obou modelů poslouží statistický softwaru Unistat a jeho funkce nelineární regresní analýzy. Na základě nově získaných hodnot bude možné pro oba modely sestavit prostorové 3D mapy přirozeného deformačního odporu v závislosti na deformaci a Zener-Hollomonovu parametru. Poté budou tyto dva modely porovnány a zhodnoceny jejich oblasti použití pro danou slitinu. Posledním bodem této práce je srovnání experimentálně naměřených hodnot přirozených deformačních odporů zkoumané slitiny s dostupnými materiály konkurenčních prací.

.

## 4. Experiment

### 4.1. Postup experimentu

Vzorky zkoumané niklové slitiny INCOLOY 825 o průměru 10 mm a výšce 15 mm, byly testovány jednoosým tlakem na plastometru Gleeble 3800. Všechny zkoumané vzorky byly ohřívány rychlostí 10 °C/s přímo na teplotu deformace. Konkrétně byly čtyři teploty deformace a to 880, 980, 1100 a 1240 °C, na těchto teplotách byly pak vzorky udržovány 180 s. Pro každou teplotu tváření byly zvoleny celkem tři rychlosti deformace, konkrétně 0,1; 2; 30 s<sup>-1</sup>. Celkem bylo tedy provedeno dvanáct zkoušek. Z plastometrických zkoušek byly získány data, ze kterých bylo následně možné sestavit grafické závislosti napětí na deformaci pro čtyři různé teploty deformace při třech různých deformačních rychlostech. Ze sestavených napětíových křivek bylo možné určit souřadnice napětíových píků, to znamená určení maximálního napětí a deformace do píku. Přímou do grafů pak byly tyto hodnoty vyznačeny za pomoci bodů. Takto určené souřadnice maximálního napětí a deformace jemu odpovídající posloužily k výpočtu aktivační energie pro tváření za tepla zkoumané niklové slitiny s využitím specializovaného softwaru ENERGY 4.0. Na základě znalosti této a dalších materiálových konstant bylo možné následně predikovat maximální přirozený deformační odpor a deformaci odpovídající napětíovému píku v celém rozsahu zkoumaných teplot a deformačních rychlostí, což bylo vyjádřeno konstrukcí prostorových – 3D grafů. Pro matematický popis napětíových křivek niklové slitiny INCOLOY 825 v daném rozsahu teplot, deformací a deformačních rychlostí byly vybrány dva matematické modely. Konkrétně model Schindler aj. (21) a model Hensel-Spittel (23). Vyčíslení konstant obou modelů bylo provedeno pomocí nelineární regrese analýzy ve statistickém softwaru Unistat.

### 4.2. Slitina INCOLOY 825

INCOLOY 825 je slitina niklu, železa a chromu s přidavkem molybdenu mědi a titanu. Chemické složení slitiny, v **tab. 4**, je navrženo tak, aby poskytovalo výjimečnou odolnost vůči různým korozním podmínkám. Nikl ve spojení s molybdenem a mědí dává slitině mimořádnou odolnost vůči redukčním prostředím, jako jsou například kyseliny sírové a kyseliny fosforečné a také vynikající odolnost vůči koroznímu praskání vyvolanému chloridovými ionty. Molybden rovněž napomáhá k odolnosti proti šterbinové korozi. Obsah chromu v slitině poskytuje odolnost vůči oxidačním prostředím jako je kyselina dusičná,

dusičnany nebo oxidační sůl. Titan s vhodným tepelným zpracováním zajišťuje stabilizaci slitiny proti senzibilaci k mezikrystalové korozi. Slitina INCOLOY 825 má dobré mechanické vlastnosti při kryogenních teplotách až mírně vysokých teplotách (538 °C). Hustota slitiny INCOLOY 825 je 8,14 g/cm<sup>3</sup> a rozsah teplot tání je 1370 – 1400 °C. Odolnost slitiny INCOLOY 825 na celkovou a lokalizovanou korozi za různých podmínek dává této slitině širokou škálu použití. Aplikace zahrnují chemické a petrochemické zpracování, těžbu ropy a zemního plynu, moření a zpracování odpadů. Tato slitina je obvykle k dispozici ve formě sochorů, tyčí, plochých výrobků, bezešvých trubek a drátu. Na **obr. 12** jsou znázorněny příklady výrobků a polotovarů slitiny INCOLOY 825 [28, 29].

**Tab. 4** Chemické složení slitiny INCOLOY 825 [28]

| Prvek  |      | Ni | Fe | Cr   | Mo  | Cu  | Ti  | C    | Mg | S    | Si  | Al  |
|--------|------|----|----|------|-----|-----|-----|------|----|------|-----|-----|
| [hm %] | min. | 38 | 22 | 19,5 | 2,5 | 1,5 | 0,6 | -    | -  | -    | 0,5 | -   |
|        | max. | 46 | -  | 23,5 | 3,5 | 3   | 1,2 | 0,05 | 1  | 0,03 | -   | 0,2 |



**Obr. 12** Příklad použití a polotovarů slitiny INCOLOY 825 [29]

#### 4.3. Plastometr Gleeble 3800

Termomechanický simulátor Gleeble 3800 na **obr. 13** je schopen provádět pokročilé termomechanické experimenty, jako jsou tlakové, tahové a krutové zkoušky při vysokých teplotách. Gleeble 3800 umožňuje provádět jednoduché nebo komplexní termomechanické zpracování vodivých materiálů při přístupu k tepelné, elektrické a mechanické odezvě materiálu, přičemž lze současně sledovat fázové transformace pomocí dilatometru.

To umožňuje vytvořit ochlazovací diagramy (CCT) a simulovat podmínky zpracování materiálů, jako je válcování za studena a za tepla, kování a svařování [30].



**Obr. 13** *Plastometr Gleeble 3800*

Vzorek je umístěn v komoře, která může být vakuově uzavřena anebo naplněna plynem. Minimální tlak v komoře je  $10^{-4}$  Torr. Fyzický simulátor má hydraulický systém s nosností 100 kN (10 tun) v tahu a 200 kN (20 tun) v tlaku s rozlišením 0,1 kN. Ohřev se provádí efektem Joule, který poskytuje rychlost ohřevu až  $10\,000\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{s}$ . Stroj umožňuje ochlazování měděných čelistí za pomoci vody, inertního plynu nebo tekutého dusíku a to pro vyšší rychlosti ochlazování. Teploty mohou být měřeny dvěma způsoby. Měření teploty termočlánkem nebo pyrometrem. Pro zkoušky vyžadující přesnost při posunu a dilataci je možné použít příslušenství, jako dilatometry nebo extenzometry [30].

#### **4.4. Popis softwaru ENERGY 4.0**

Speciálně vyvinutý program ENERGY 4.0 umožňuje velmi účinnou interaktivní práci při výpočtu aktivační energie.

Velmi snadným způsobem lze vylučovat a zpětně zahrnovat vybrané hodnoty do dané regrese. Výběr vyloučené hodnoty závisí pouze na osobním zvážení grafických informací na monitoru počítače. Toto posouzení vnáší do výpočtu subjektivní prvek, což je příznivé pouze za přítomnosti kvalifikované osoby, znalé základních procesů, které ovlivňují umístění jednotlivých bodů (rozptyl dat, strukturní vlivy). Vyčíslení konstant  $n$  a  $a$  při zvolené teplotní hladině je v tomto postupu největší slabinou, jelikož nemusí znamenat optimum

z kompletního souboru dat. Na druhou stranu jednodušší způsob, jak při výpočtu snížit velký rozptyl experimentálních dat, neexistuje. Tento postup je nejsnadnější pro určování teplotních oblastí, ve kterých se materiál chová specificky a to vlivem určitých strukturních změn. Například vliv vylučování karbidů nebo menšinové feritické fáze, se při vykreslování příslušné regresní závislosti projeví odchylkou od dané přímky.

Program ENERGY 4.0 používá pro výpočet aktivačních energií sestavu metod vícenásobné lineární a nelineární regrese. Výpočet nejprve zahrnuje předběžné použití metody vícenásobné lineární regrese, která slouží pro vyloučení hodnot nesledujících uspokojivě očekávané trendy. Následně využije pro výsledky lineární regrese zpřesňující způsob pomocí metody nejmenších čtverců na základě nelineárních regresí. Program ENERGY 4.0 používá pro výpočet aktivační energie rovnici odvozenou Sellarsem a Tegartem. Tento základní vztah popisuje závislost deformačního napětí na termodynamických podmínkách deformace [31].

#### 4.5. Popis softwaru Unistat

Statistický software Unistat je doplněk pro analýzu dat, a může být využit buď jako samostatný program nebo jako doplněk pro program Excel. Je to kompaktní program s důrazem na snadné používání a kvalitu výstupu. Unistat má mnoho silných stránek, včetně jeho velmi dobré trojrozměrné schopnosti, vícerozměrné statistické grafiky, ikonové grafiky a možností vykreslování x-y grafů. Unistat má také schopnost generovat trojrozměrné bivariate histogramy. Software Unistat má sadu funkcí, které jsou snadno dostupné pro vykreslování, montáž nebo vytváření dat. Kromě toho má také interaktivní datové spoje v rámci své x-y grafiky, které jsou vynikající pro kontrolu odlehlých míst [32].

#### 4.6. Výpočet deformačního odporu pomocí modelu Schindler aj.

Model Schindler, Bořuta, Kliber dále pak Schindler aj. je model, který dělí křivku napětí – deformace na tři oblasti. První oblast křivky uvádí hodnotu deformace od počátku po dosažení inflexního bodu na křivce. Inflexní bod je na napěťové křivce umístěn mezi deformací do píku a deformací pro dosažení ustáleného plastického toku. Tuto oblast lze popsat následujícím vztahem [33,34].

$$\sigma = p_1 \cdot e^{p_2} \cdot \exp\left(-p_2 \cdot \frac{e}{e_p}\right) \cdot e^{\left(p_3 - \frac{p_4}{T}\right)} \cdot \exp(-p_5 \cdot T) \quad (21)$$

Druhá oblast je na napět'ové křivce umístěna mezi inflexním a deformací pro dosažení plastického toku a charakterizuje jí kvadratická funkce. Poslední oblastí napět'ové křivky je ustálený plastický tok, kterého lze dosáhnout pomocí následujícího vztahu [33,34].

$$\sigma_{ss} = L \cdot \sigma_p \quad (22)$$

#### 4.7. Výpočet deformačního odporu pomocí modelu Hensel-Spittel

Pro predikci deformačního odporu za vysokých teplot je používán model Hensel-Spittel (23). Tento model je například využíván pro simulace deformačního chování materiálu za tepla v programu FORGE [35, 36].

$$\sigma = p_1 \cdot \exp(p_2 \cdot t) \cdot t^{p_3} \cdot e^{p_4} \cdot \exp\left(\frac{p_5}{e}\right) \cdot (1 + e)^{(p_6 \cdot t)} \cdot \exp(p_7 \cdot e) \cdot \dot{\epsilon}^{p_8} \cdot \dot{\epsilon}^{(p_9 \cdot t)} \quad (23)$$

Tento vztah obsahuje teplotu, deformaci a deformační rychlost jako parametry, které definují současný stav materiálu. Už na první pohled je model (23) složitější než model (21). Model Hensel-Spittel obsahuje dokonce dva deformační členy založené na exponenciální funkci, zahrnuje také rychlostní a teplotní členy. Zahrnuje celkem devět materiálových konstant stanovovaných pomocí regresní analýzy. Model (23) ovšem nezačleňuje deformaci do píku, kdežto model (21) ano [35, 36].

#### 4.8. Analýza křivek napětí - deformace

Pro sestrojení křivek napětí v závislosti na deformaci, byly použity data získány z plastometrických zkoušek jednoosým tlakem, které byly provedeny na plastometru Gleeble 3800. Program Excel od společnosti Microsoft posloužil pro vyhodnocení a samotnou konstrukci křivek napětí – deformace. Při samotném zkoušení vzorků byla v daném čase zaznamenávána adekvátní hodnota napětí a hodnota deformace. V programu Excel byly následně sestrojeny grafické závislosti napětí na deformaci a to jednotlivě pro každý zkoumaný vzorek. Získané grafické závislosti dále posloužily pro získání dat, velmi důležitých pro další vyhodnocování. Z grafů napětí – deformace byly odečteny souřadnice napět'ových píků, hodnoty maximálního napětí  $\sigma_{max}$  a k tomu náležitá hodnota deformace  $e_p$  při daných teplotách deformace a deformačních rychlostech. Zda došlo u

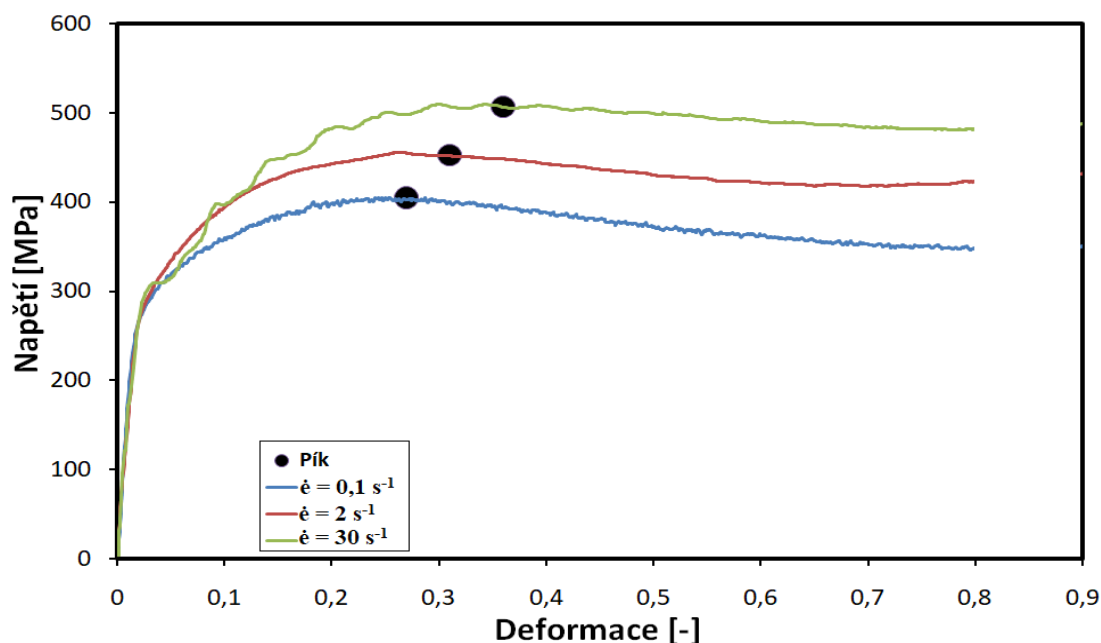


jednotlivých vzorků k uzdravovacím procesům a zda bylo dosaženo ustáleného plastického toku (steady – state), lze také predikovat z těchto grafických závislostí.

Na **obr. 14**, **obr. 15**, **obr. 16** a **obr. 17**, jsou znázorněny křivky napětí – deformace pro jednotlivé teploty deformace (880, 980, 1100, 1240 °C), přičemž v každém grafu je zahrnut vliv rychlosti deformace (0,1; 2; 30 s<sup>-1</sup>). Po zkonstruování napěťových křivek bylo možné vyznačit napěťové píky. Hodnoty napěťových píků jsou zapsány v **tab. 5**.

**Obr. 14** znázorňuje napěťovou křivku při nominální teplotě 880 °C, pro tři různé deformační rychlosti. Oblasti napěťových píků jsou u všech křivek celkem patrné a jsou vyznačeny černými body.

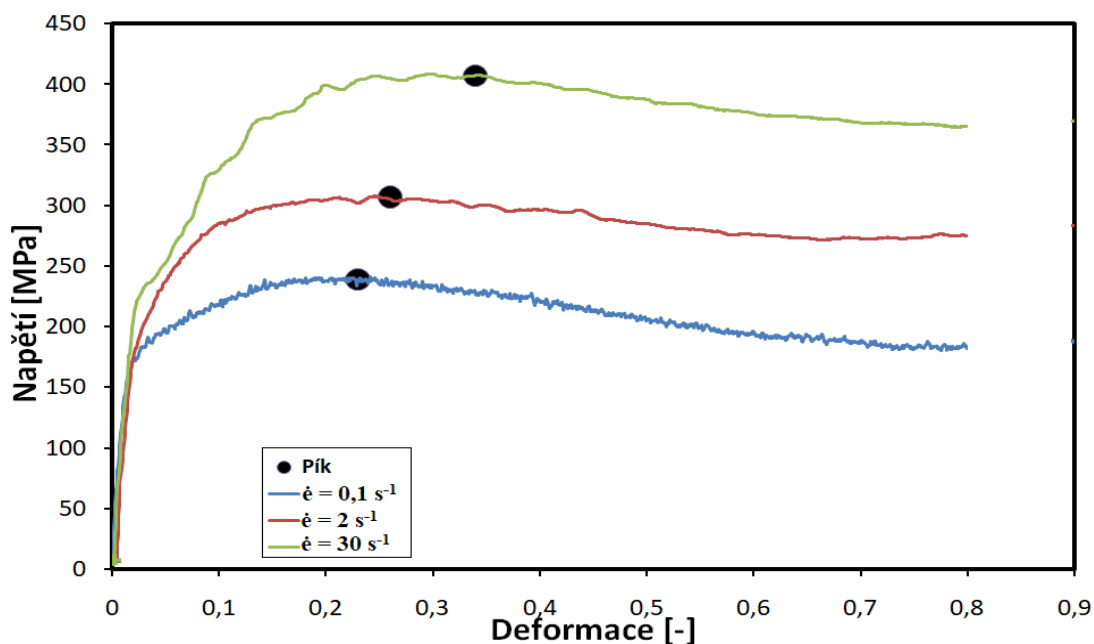
Pro všechny napěťové křivky platí stejný průběh a to takový, že od počátku grafu dochází v materiálu proces zpevňování, až po dosažení hodnoty deformace do píku  $e_p$ , která se shoduje se začátkem dynamické rekrytalizace, po překročení této hodnoty převládá v materiálu dynamická rekrytalizace, což způsobuje snížení pnutí a následně k ustálení plastického toku (při vyšších hodnotách deformace).



**Obr. 14** Graf závislosti napětí na deformaci pro teplotu 880 °C a deformační rychlosti 0,1; 2; 30 s<sup>-1</sup>

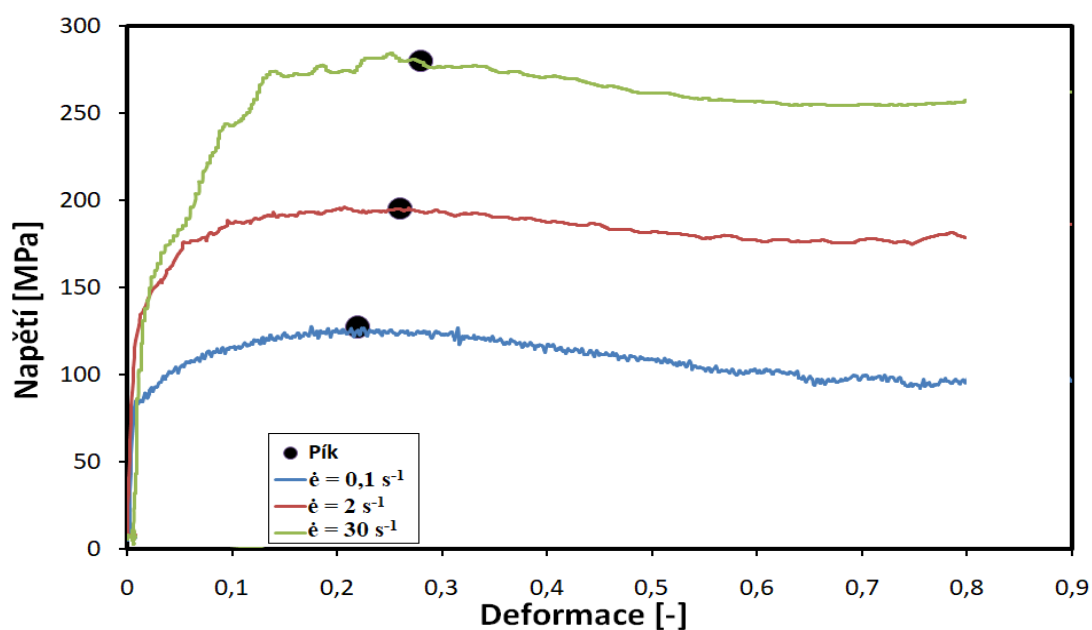
Při vyšší teplotě deformace konkrétně 980 °C můžeme pozorovat pokles napětí, což souvisí se snížením deformačního odporu v materiálu. Opět nastala dynamická rekrytalizace s následným ustálením plastického toku. Napěťové křivky pro teplotu 980 °C jsou znázorněny na **obr. 15**.





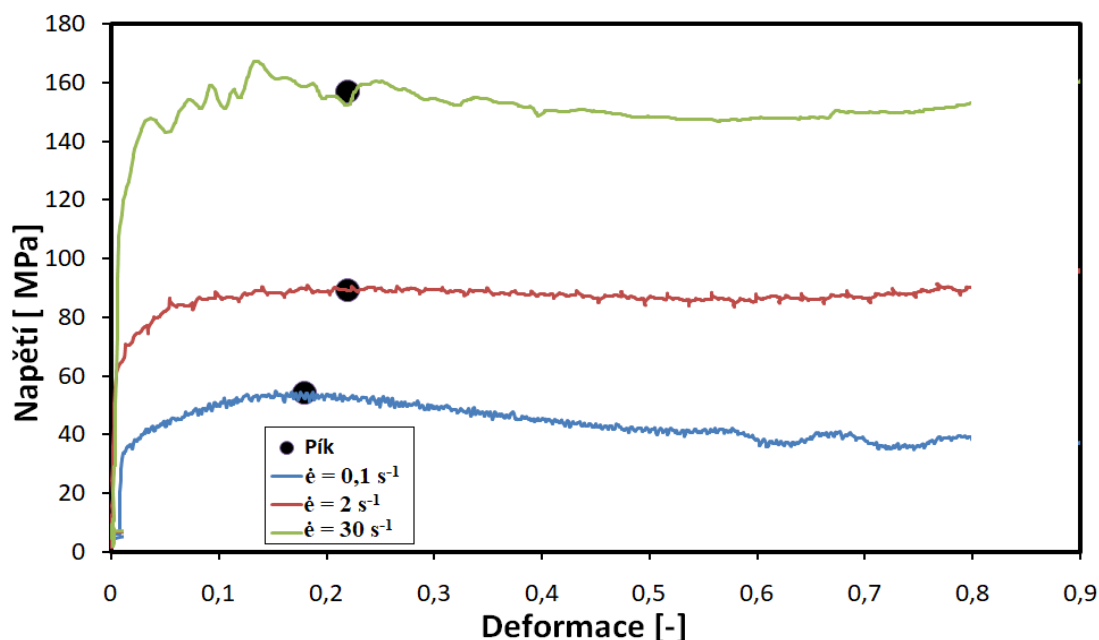
**Obr. 15** Graf závislosti napětí na deformaci pro teplotu 980 °C a deformační rychlosti 0,1; 2; 30  $\text{s}^{-1}$

Zvýšením nominální teploty deformace na 1100 °C, tak došlo opět ke snížení deformačního odporu v materiálu, tím pádem i ke snížení maximálního napětí  $\sigma_{max}$ . Je také patrné, že hodnoty maximálních napětí  $\sigma_{max}$  mají větší rozdíly než u předešlých teplot. Grafická závislost napětí na deformaci pro teplotu 1100 °C je zobrazena na **obr. 16**.



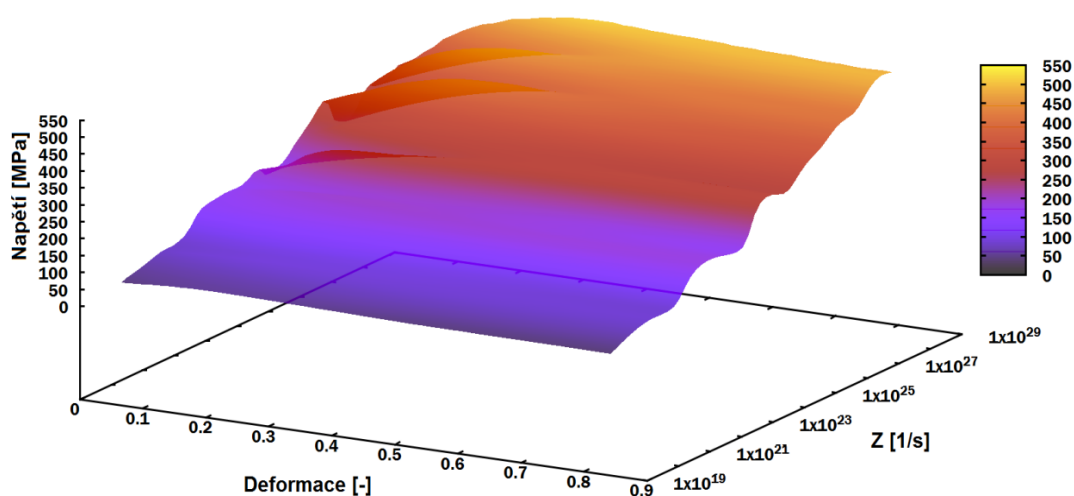
**Obr. 16** Graf závislosti napětí na deformaci pro teplotu 1100 °C a deformační rychlosti 0,1; 2; 30  $\text{s}^{-1}$

Na **obr. 17** jsou zobrazeny napěťové křivky pro nejvyšší teplotu, konkrétně 1240°C. Při této teplotě jsou hodnoty deformačního odporu nejnižší. Můžeme také pozorovat, že při deformační rychlosti  $2 \text{ s}^{-1}$  je průběh napěťové křivky téměř konstantní, proto bylo komplikovanější zaznamenat napěťový pík (maximální napětí  $\sigma_{max}$  a deformaci do píku  $e_p$ ).



**Obr. 17** Graf závislosti napětí na deformaci pro teplotu 1240 °C a pro deformační rychlosti 0,1; 2; 30 s<sup>-1</sup>

Ze získaných naměřených dat byla pomocí softwaru GNUPLOT vytvořena 3D grafická závislost napětí na deformaci a Zener-Hollomonovu parametru, který v sobě nese kombinaci vlivu deformační rychlosti a teploty (**obr. 18**). Vytvořená 3D mapa přirozeného deformačního odporu kopíruje naměřené hodnoty a přehledně svým zvlněním především v částech před napěťovými píky dokumentuje neplynulost nárůstu přirozeného deformačního odporu v závislosti na hodnotě  $Z$ .



**Obr. 18** 3D graf závislosti naměřeného napětí na deformaci a Zener-Hollomonovu parametru

V **tab. 5** jsou zaznamenány napěťové píky, hodnoty maximálního napětí  $\sigma_{max}$  a k tomu příslušná hodnota deformace do píku  $e_p$  a hodnoty Zener-Hollomonova parametru  $Z$ . Z **tab. 5** je tedy patrné, že při zvyšující se teplotě dochází k poklesu maximálního napětí a deformace do píku.

**Tab. 5** Hodnoty napěťových píků a Zener-Hollomonova parametru

| Teplota | Deformační rychlost | Napětí | Deformace | Zener-Hollomonův parametr |
|---------|---------------------|--------|-----------|---------------------------|
| [°C]    | [s <sup>-1</sup> ]  | [MPa]  | [-]       | [s <sup>-1</sup> ]        |
| 1240    | 0,1                 | 54     | 0,18      | 6,36529E+19               |
|         | 2                   | 89     | 0,22      | 1,27306E+21               |
|         | 30                  | 157    | 0,22      | 1,90959E+22               |
| 1100    | 0,1                 | 127    | 0,22      | 8,41161E+21               |
|         | 2                   | 195    | 0,26      | 1,68232E+23               |
|         | 30                  | 276    | 0,26      | 2,52348E+24               |
| 980     | 0,1                 | 239    | 0,23      | 1,31867E+24               |
|         | 2                   | 307    | 0,26      | 2,63734E+25               |
|         | 30                  | 407    | 0,34      | 3,95601E+26               |
| 880     | 0,1                 | 404    | 0,27      | 1,98851E+26               |
|         | 2                   | 452    | 0,31      | 3,97703E+27               |
|         | 30                  | 506    | 0,36      | 5,96554E+28               |

## 5. Diskuze výsledků

### 5.1. Stanovení aktivační energie za tepla

Hodnoty aktivační energie za tepla slitiny INCOLOY 825 byly stanoveny pomocí softwaru ENERGY 4.0. Program ENERGY 4.0 využívá pro výpočet aktivační energie rovnici odvozenou Sellarsem a Tegartem (2).

Software ENERGY 4.0 pracuje ve dvou režimech, ve kterých určí hodnoty aktivační energie. Prvním je manuální režim, kde se určí hodnoty aktivační energie a následně dojde ke zpřesnění výsledků z manuálního režimu v režimu automatickém.

Celkem byly tedy stanoveny dvě hodnoty aktivační energie a materiálových konstant, tyto hodnoty jsou znázorněny v **tab. 6**.

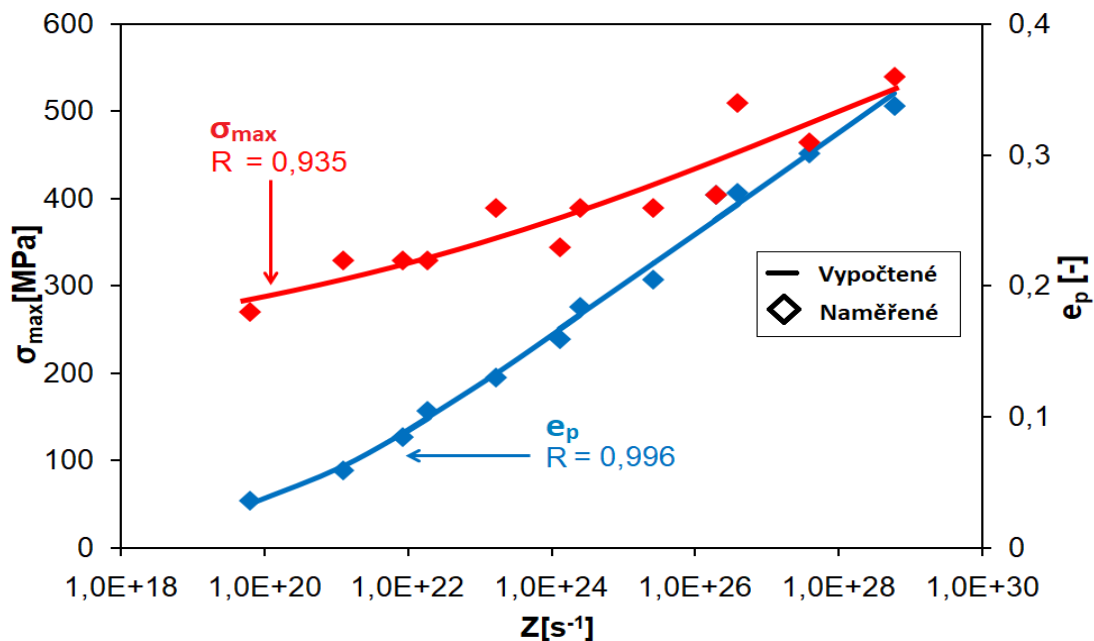
**Tab. 6** Hodnoty aktivační energie při tváření za tepla a materiálových konstant pro slitinu INCOLOY 825 z programu ENERGY 4.0

| Veličina                           | Manuální režim        | Automatický režim     | Jednotka                |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|
| <b>Q</b>                           | <b>834,61</b>         | <b>602,63</b>         | [kJ·mol <sup>-1</sup> ] |
| <b>n (1240°C)</b>                  | 5,31                  | 4,1346                | [-]                     |
| <b><math>\alpha</math> (880°C)</b> | 0,01052               | 0,0096                | [MPa <sup>-1</sup> ]    |
| <b>C</b>                           | 6,18·10 <sup>28</sup> | 1,17·10 <sup>21</sup> | [s <sup>-1</sup> ]      |
| <b>U</b>                           | 0,04534               | 0,04583               | [-]                     |
| <b>W</b>                           | 0,022                 | 0,031                 | [-]                     |

Předpokládá se, že z dosažených hodnot v **tab. 6** jsou přesnější výsledky získané v automatickém režimu, tudíž lze tvrdit, že hodnotu aktivační energie slitiny INCOLOY 825 program ENERGY 4.0 stanovil na hodnotu 602,63 kJ·mol<sup>-1</sup>.

Za pomoci hodnot v **tab. 6** stanovil automatický i manuální režim v programu ENERGY 4.0 také nové hodnoty maximálních deformačních napětí  $\sigma_{max}$  a píkových deformací  $e_p$  pro konkrétní teploty deformace a deformační rychlosti. Tyto nově vypočtené a získané hodnoty maximálních deformačních napětí  $\sigma_{max}$  a deformace odpovídající píku  $e_p$  jsou znázorněny v **tab. 7**.

Naměřené a vypočtené hodnoty deformací odpovídajících napětíovému píku a maximálních napětí v automatickém režimu programu ENERGY 4.0, byly porovnány v závislosti na Zener-Hollomonovu parametru (**obr. 19**).



**Obr. 19** Graf závislosti maximálního napětí a píkové deformace na Zener-Hollomonovu parametru

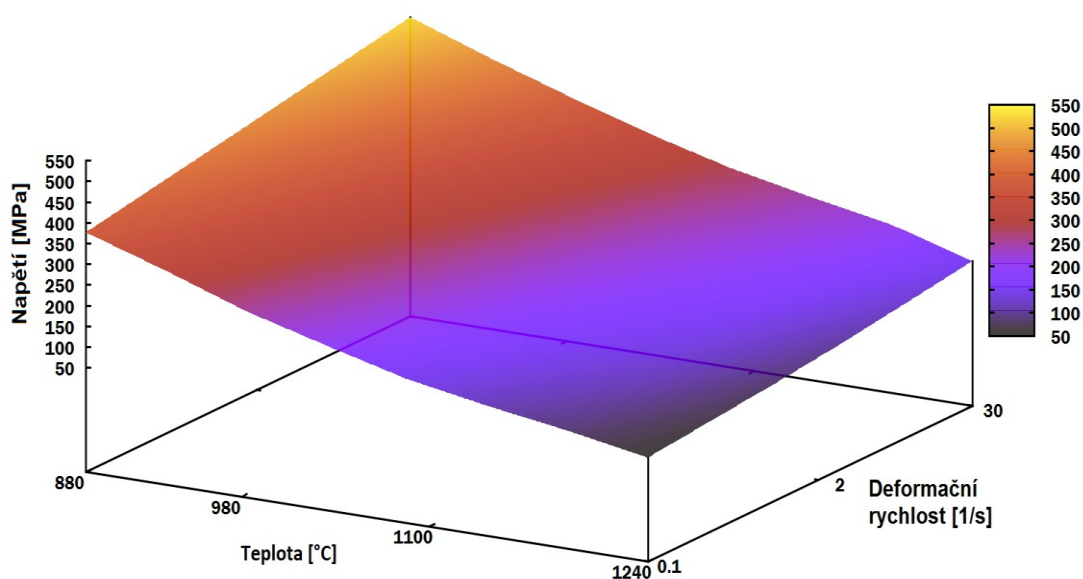
Přesnost mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami maximálních napětí a píkových deformací určuje koeficient korelace R. Z **obr. 19** je zřejmé, že v obou případech ( $\sigma_{max}$  a  $e_p$ ) bylo dosaženo poměrně dobré shody. Mírně vyšší přesnost je u deformací odpovídajících napětíovému píku, kde má koeficient korelace R hodnotu 0,996.

**Tab. 7** Nově vypočtené a naměřené hodnoty píkovej deformace  $e_p$  a maximálního napětí  $\sigma_{max}$ 

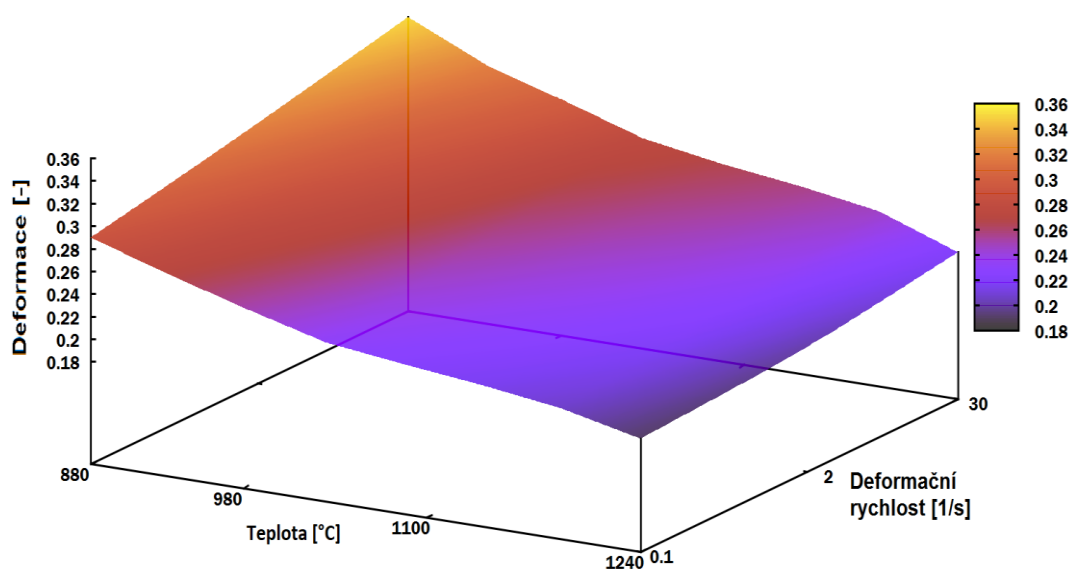
|         |                     | Naměřené |           | Vypočtené manuálním režimem |           | Vypočtené automatickým režimem |           |
|---------|---------------------|----------|-----------|-----------------------------|-----------|--------------------------------|-----------|
| Teplota | Deformační rychlost | Napětí   | Deformace | Napětí                      | Deformace | Napětí                         | Deformace |
| [°C]    | [s <sup>-1</sup> ]  | [MPa]    | [-]       | [MPa]                       | [-]       | [MPa]                          | [-]       |
| 1240    | 0,1                 | 54       | 0,18      | 58                          | 0,19      | 50                             | 0,19      |
| 1240    | 2                   | 89       | 0,22      | 94                          | 0,2       | 94                             | 0,2       |
| 1240    | 30                  | 157      | 0,22      | 134                         | 0,22      | 149                            | 0,22      |
| 1100    | 0,1                 | 127      | 0,22      | 151                         | 0,22      | 131                            | 0,22      |
| 1100    | 2                   | 195      | 0,26      | 202                         | 0,24      | 200                            | 0,24      |
| 1100    | 30                  | 276      | 0,26      | 249                         | 0,25      | 267                            | 0,26      |
| 980     | 0,1                 | 239      | 0,23      | 273                         | 0,26      | 251                            | 0,25      |
| 980     | 2                   | 307      | 0,26      | 326                         | 0,28      | 326                            | 0,28      |
| 980     | 30                  | 407      | 0,34      | 374                         | 0,29      | 394                            | 0,3       |
| 880     | 0,1                 | 404      | 0,27      | 397                         | 0,3       | 377                            | 0,29      |
| 880     | 2                   | 452      | 0,31      | 450                         | 0,32      | 452                            | 0,32      |
| 880     | 30                  | 506      | 0,36      | 499                         | 0,34      | 521                            | 0,35      |

Na základě získaných nově vypočtených hodnot ze softwaru ENERGY 4.0, byly sestrojeny dva 3D grafy závislostí maximálního napětí na teplotě a deformační rychlosti a graf závislosti píkovej deformaci na teplotě a deformační rychlosti. Tyto grafy jsou znázorněny na **obr. 20** a **21**. Konkrétně **obr. 20** znázorňuje graf závislosti vypočteného maximálního napětí na teplotě a deformační rychlosti, kde je patrné, že čím je nižší teplota a vyšší deformační rychlost, tak hodnota napětí stoupá. Naopak s nejvyšší teplotou deformace a nejnižší deformační rychlosti je hodnota napětí nejmenší.

Graf na **obr. 21** zachycuje podobnou závislost jako na **obr. 20**. Na **obr. 21** je zachycena závislost píkovej deformace, která opět s rostoucí teplotou a deformační rychlostí klesá.



**Obr. 20** 3D graf závislosti vypočteného maximálního napětí na teplotě a deformační rychlosti



**Obr. 21** 3D graf závislosti vypočtené píkovej deformace na teplotě a deformační rychlosti

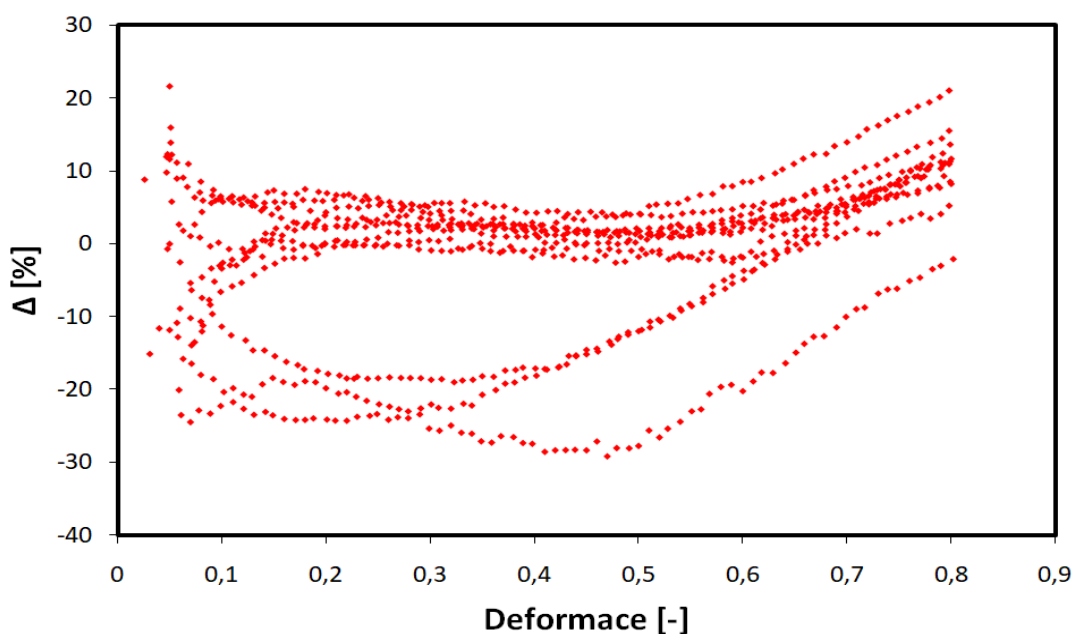
## 5.2. Výpočet materiálových konstant pro model Schindler aj.

Za pomoci nelineární regresní analýzy ve statistickém softwaru Unistat, byly získány materiálové konstanty modelu Schindler aj. Pro modelování posloužila jako počáteční data naměřené hodnoty deformačního odporu, dané teploty deformace, deformační rychlosti a dopočítané deformace do píku.

Do statistického softwaru Unistat byl jako první zadán model pro popis deformačního odporu (21). Následně se stanovily hodnoty, které jsou závisle nebo nezávisle proměnné v tomto modelu. V tomto případě byly nezávisle proměnné hodnoty rychlosti deformace, teploty, deformace a deformace do píku. Hodnota deformačního odporu byla u modelu (21) závisle proměnnou hodnotou. Za pomoci nelineární regresní analýzy byly po dosazení daných vstupních dat a hrubém nástřelu materiálových konstant  $p_1$  až  $p_5$ , získány nové konstanty modelu (21). Díky obdržení nových materiálových konstant byly získány nové teoretické hodnoty deformačních odporů. Po provedení regresní analýzy, byla zjištěna míra neshody mezi teoretickými a skutečnými daty, na základě toho byla následujícím vztahem (24) vypočtena hodnota odchylky deformačního odporu  $\Delta$ .

$$\Delta = \frac{\sigma_{skut} - \sigma_{teor}}{\sigma_{skut}} \cdot 100\% \quad (24)$$

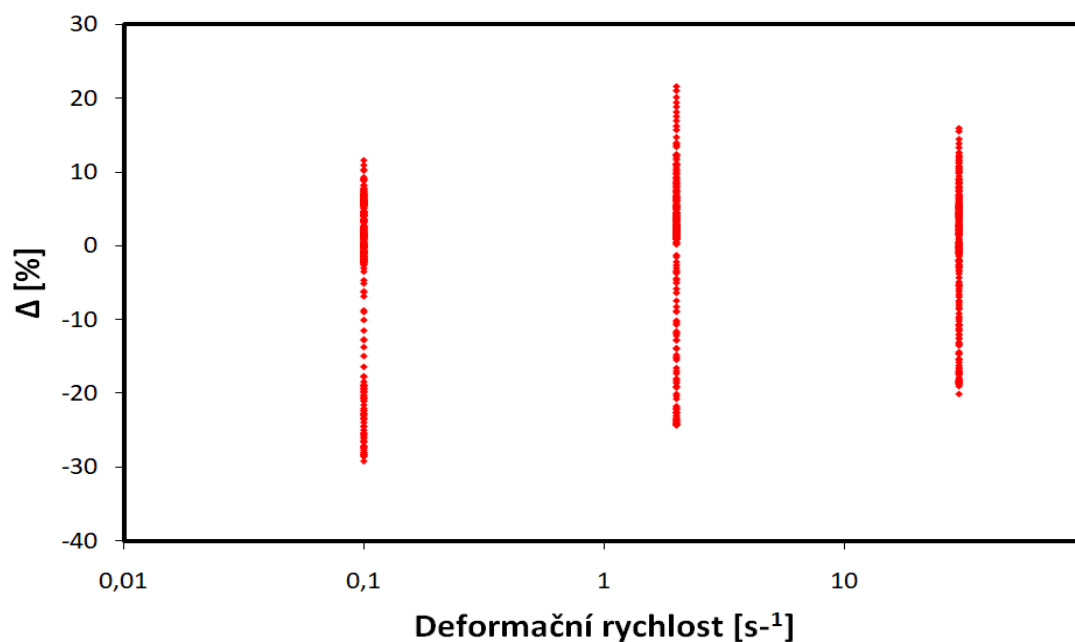
Na základě vypočtených odchylek byly sestrojeny grafické závislosti odchylky  $\Delta$  na deformaci, deformační rychlosti a teplotě (**obr. 22, 23 a 24**). Z **obr. 22** je zřejmé, že se hodnota odchylky  $\Delta$ , až na pár výjimek, nejvíce objevuje kolem nulové hodnoty, lze tedy tvrdit, že zde dochází k rovnoměrnému rozložení hodnot kolem nulové hodnoty. Tři napět'ové křivky, jejichž odchylka se blíží k -30 %, náleží teplotě deformace 1240 °C.



**Obr. 22** Graf závislosti odchylky na deformaci pro model Schindler aj.

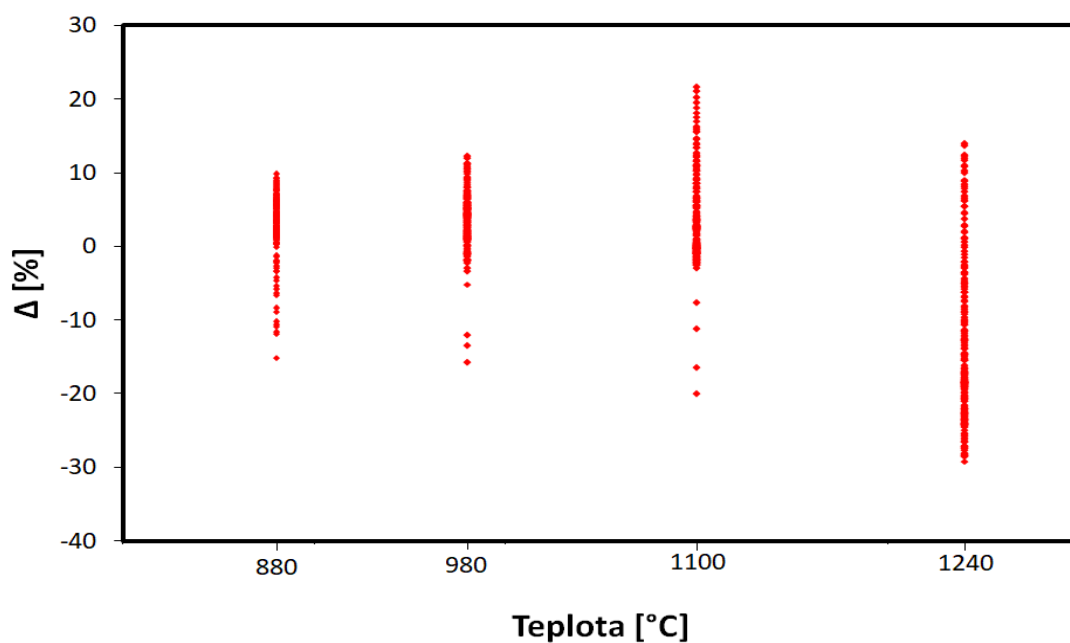


U grafické závislosti odchylky na deformační rychlosti **obr. 23**, je možno sledovat největšího rozptylu dat při rychlosti deformace  $2 \text{ s}^{-1}$  a naopak při vyšších hodnotách rychlosti deformace se rozptyl dat snižuje.



**Obr. 23** Graf závislosti odchylky na deformační rychlosti pro model Schindler aj.

**Obr. 24** znázorňuje závislost odchylky na teplotě a je patrné, že rozptyl dat se zvyšuje se zvyšující se teplotou deformace.



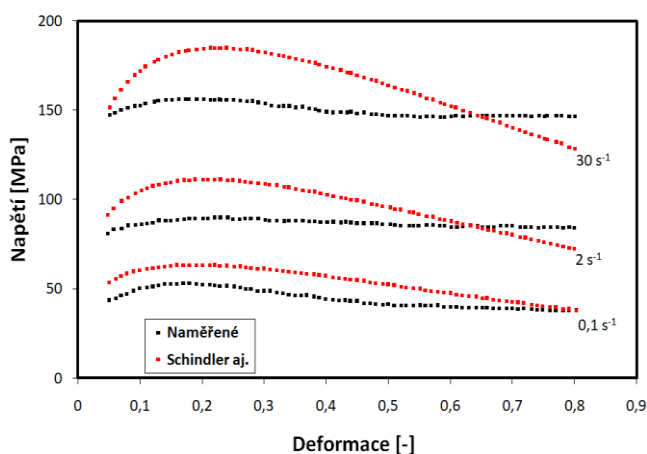
**Obr. 24** Graf závislosti odchylky na teplotě pro model Schindler aj.

V **tab. 8** jsou zaznamenány hodnoty definitivních materiálových konstant  $p_1$  až  $p_5$  pro model Schindler aj. určených v programu Unistat pomocí nelineární regresní analýzy. V **tab. 8** je také znázorněn koeficient determinace  $R^2$ , který potvrzuje relativně dobrou přesnost tohoto modelu.

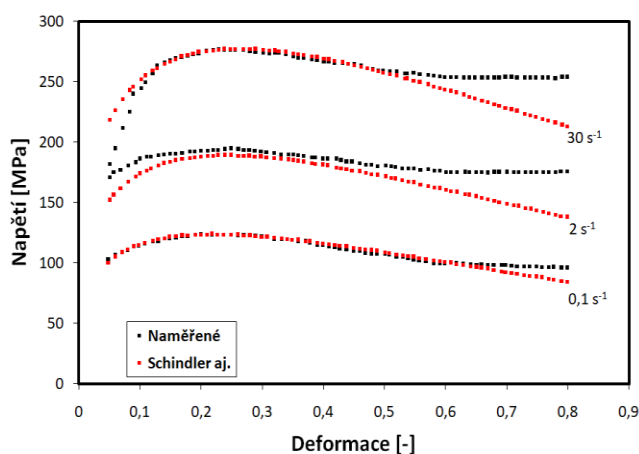
**Tab. 8** Hodnoty materiálových konstant a koeficientu determinace pro model Schindler aj.

| P1         | P2     | P3     | P4       | P5     | $R^2$  |
|------------|--------|--------|----------|--------|--------|
| 55945,2937 | 0,2815 | 0,6328 | 686,8958 | 0,0037 | 0,9768 |

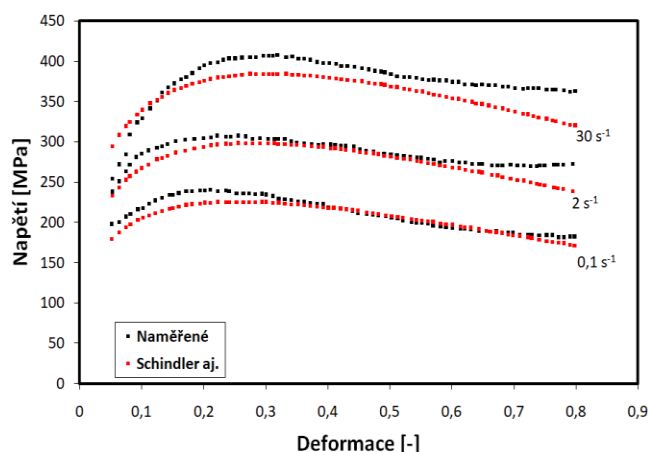
Pomocí materiálových konstant z **tab. 8**, byly získány nové teoretické hodnoty deformačních odporů, které byly porovnány se skutečnými hodnotami (**obr. 25 až 28**). Z těchto grafických závislostí lze vypožorovat, že čím nižší je teplota, tím je shoda mezi skutečnými a teoretickými hodnotami vyšší. Dále také z těchto grafů vyplývá, že lepší shody mezi skutečnými a teoretickými hodnotami je dosahováno při nižších hodnotách rychlosti deformace. Největší potíže má model Schindler aj. při predikci deformačních odporů za vysokých teplot a vysokých rychlostí deformace, což je zřejmé z **obr. 25**. Naopak při kombinaci nižší teploty a nižší rychlosti deformace má tento model menší problémy při predikci deformačních odporů **obr. 26**.



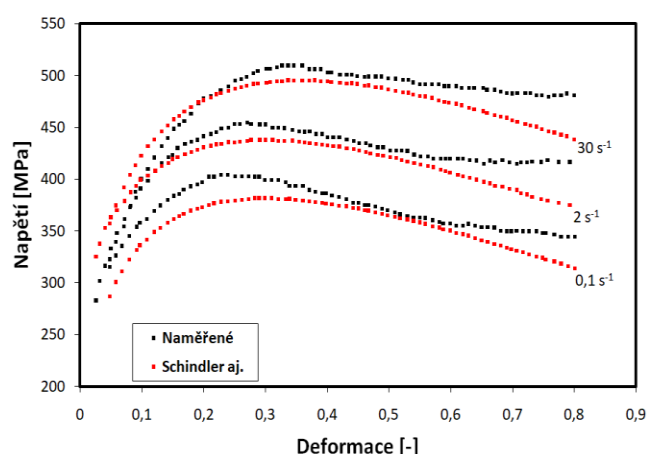
**Obr. 25** Grafické srovnání naměřeného a podle modelu Schindler aj. vypočteného přirozeného deformačního odporu zkoumané slitiny pro teplotu deformace 1240 °C



**Obr. 26** Grafické srovnání naměřeného a podle modelu Schindler aj. vypočteného přirozeného deformačního odporu zkoumané slitiny pro teplotu deformace 1100 °C

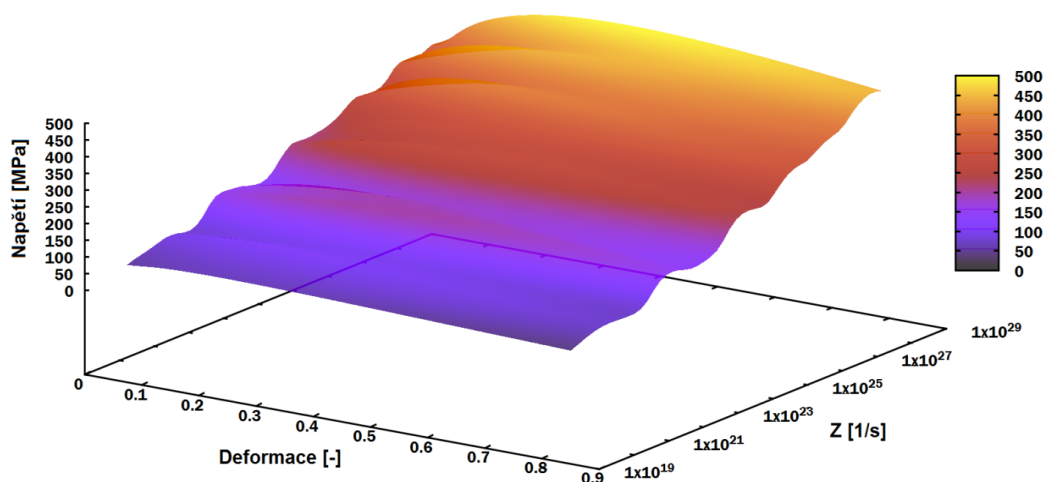


**Obr. 27** Grafické srovnání naměřeného a podle modelu Schindler aj. vypočteného přirozeného deformačního odporu zkoumané slitiny pro teplotu deformace 980 °C



**Obr. 28** Grafické srovnání naměřeného a podle modelu Schindler aj. vypočteného přirozeného deformačního odporu zkoumané slitiny pro teplotu deformace 880 °C

Na základě nově získaných hodnot deformačních odporů pro model Schindler aj., byla vytvořena 3D grafická závislost napětí na deformaci a Zener-Hollomovu parametru (**obr. 29**). Srovnání 3D mapy pro přirozený deformační odpor zkoumané slitiny po výpočtu pomocí modelu Schindler aj. (**obr. 29**) s naměřenými daty (**obr. 18**) je zřejmé vyhlazení oblastí před napěťovým píkem, což více odpovídá teoretickým předpokladům.



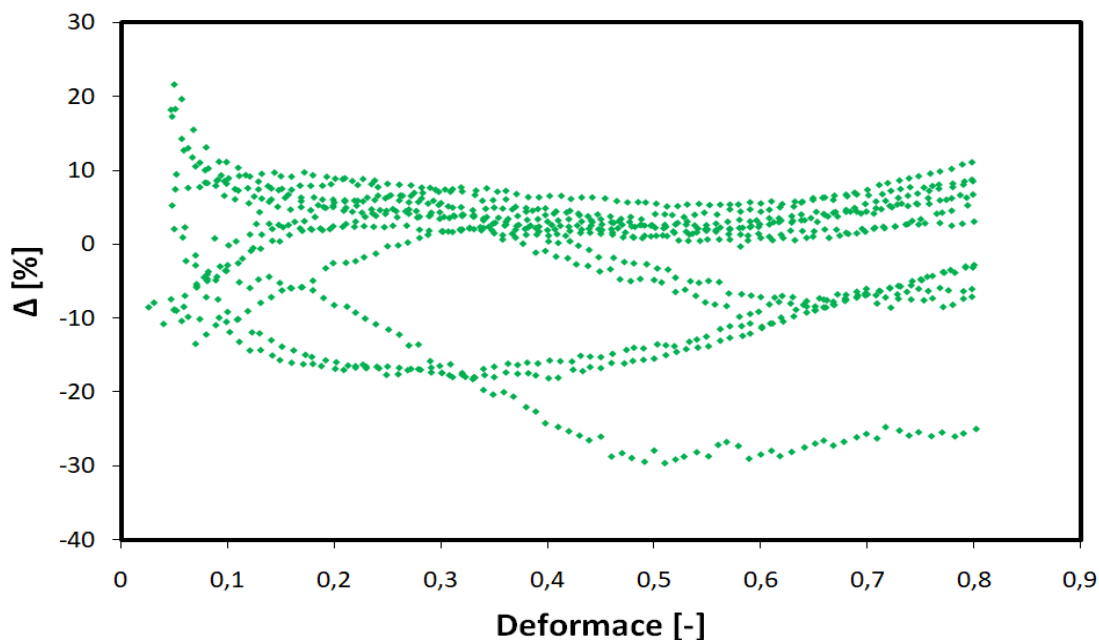
**Obr. 29** 3D graf závislosti získaného napětí na deformaci a Zener-Hollomonovu parametru pro model Schindler aj.

### 5.3. Výpočet materiálových konstant pro model Hensel-Spittel

Stejně jako v prvním případě byly hodnoty materiálových konstant získány pomocí statistického softwaru Unistat.

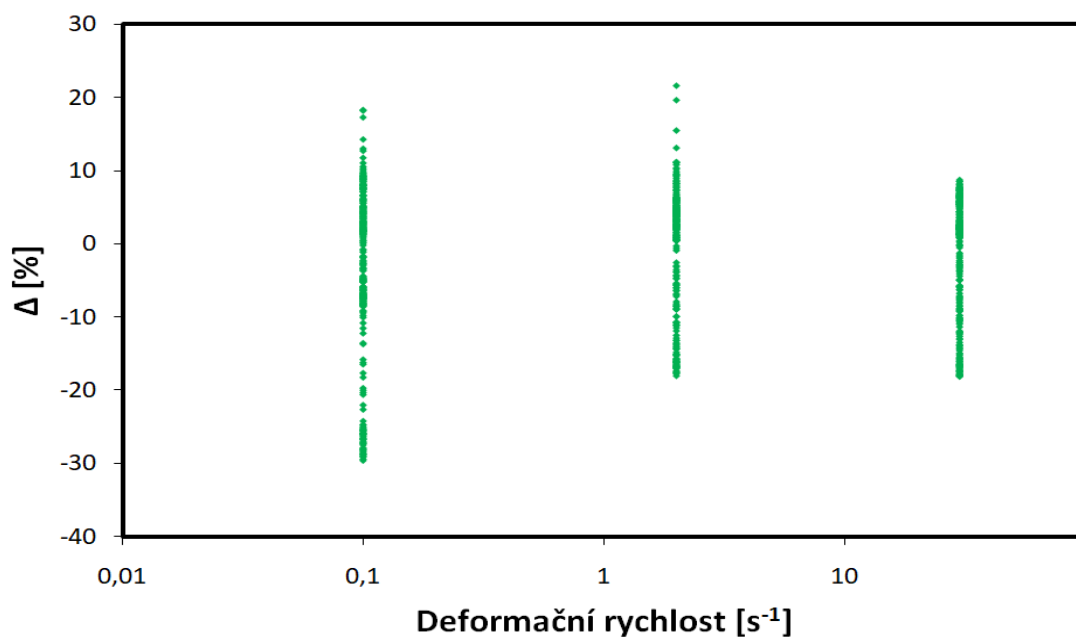
Pro stanovení materiálových konstant pro model Hensel-Spittel, bylo opět nezbytné zadat do softwaru Unistat model Hensel-Spittel a znovu určit jeho závisle a nezávisle proměnné. Kromě hodnoty deformace do píku zůstávaly hodnoty nezávisle proměnných stejné. Závisle proměnnou hodnotou byl znovu deformační odpor. Při dosazování vstupních dat experimentálních deformací a deformačních odporů, bylo využito získaných hodnot z plastometru Gleeble 3800. Následovalo dosažení přibližných hodnot materiálových konstant  $p_1$  až  $p_9$ , které byly získány v průběhu jiného řešení. Následně byly na základě nelineární regresní analýzy určeny nové hodnoty materiálových konstant.

**Obr. 30, 31 a 32** zobrazují grafické závislosti odchylky  $\Delta$  pro model Hensel-Spittel na deformaci, teplotě a deformační rychlosti. Na **obr. 30** je znázorněna grafická závislost odchylky  $\Delta$  na deformaci  $e$ . Z grafu lze vypožorovat, že se odchylky až na drobné výjimky pohybují od -10 do 10 %. Největší odchylky zaznamenaly napěťové křivky pro teplotu deformace 1240 °C a konkrétně pro rychlost deformace 0,1 s<sup>-1</sup> se blíží až k -30 %.



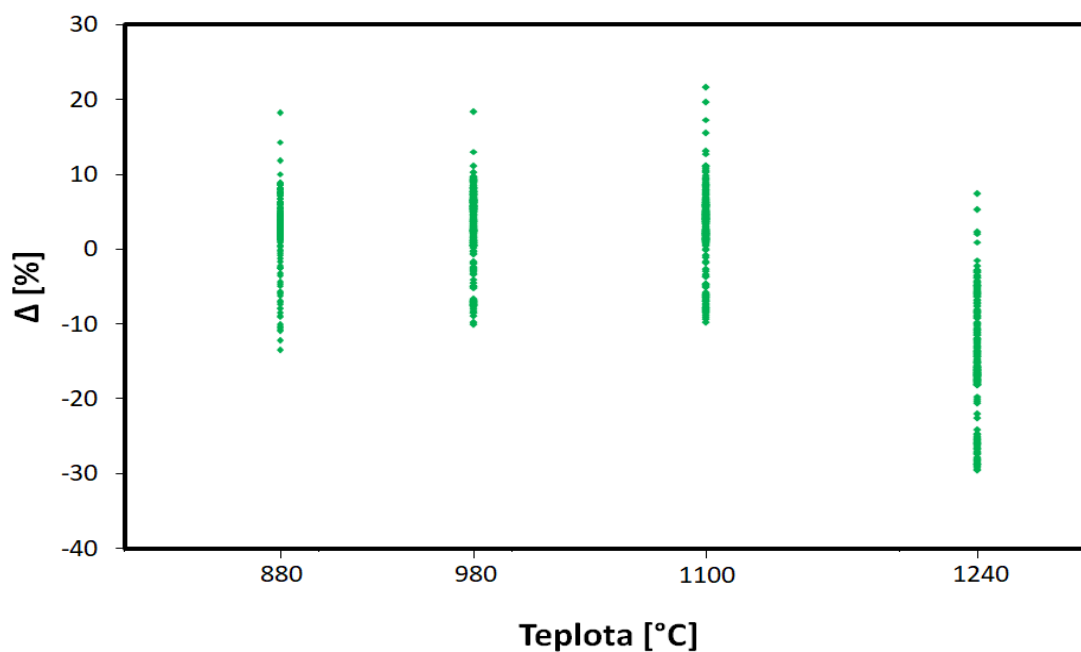
**Obr. 30** Graf závislosti odchylky na deformaci pro model Hensel-Spittel

Z **obr. 31** vyplývá, že nejmenší odchylka  $\Delta$  je pro nejvyšší rychlost deformace v tomto případě 30 s<sup>-1</sup>, odchylka se pohybuje zhruba od -20 do 10 %. Při nižších rychlostech deformace se hodnota odchylky pohybuje od -30 do 20 %.



**Obr. 31** Graf závislosti odchylky na deformační rychlosti pro model Hensel-Spittel

Na **obr. 32** je znázorněna grafická závislost odchylky  $\Delta$  na teplotě pro model Hensel-Spittel, kde je možné vidět, že se odchylka  $\Delta$  pro model Hensel-Spittel při teplotě 1240 °C blíží až k 30 % v absolutní hodnotě. Při teplotách nižších se odchylka pohybuje od -15 do 20 %.



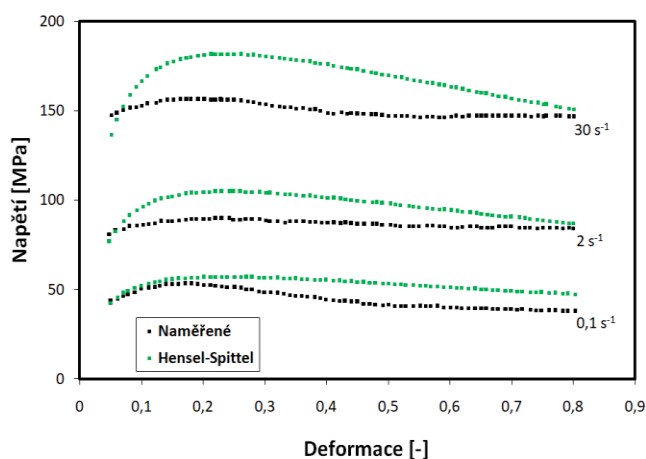
**Obr. 32** Graf závislosti odchylky na teplotě pro model Hensel-Spittel

V **tab. 9** jsou uvedeny materiálové konstanty a koeficient determinace  $R^2$  pro model Hensel-Spittel (23). Koeficient determinace je v tomto případě o jednu tisícinu vyšší, než pro model Schindler aj., což znamená, že jsou tyto dva modely prakticky stejné.

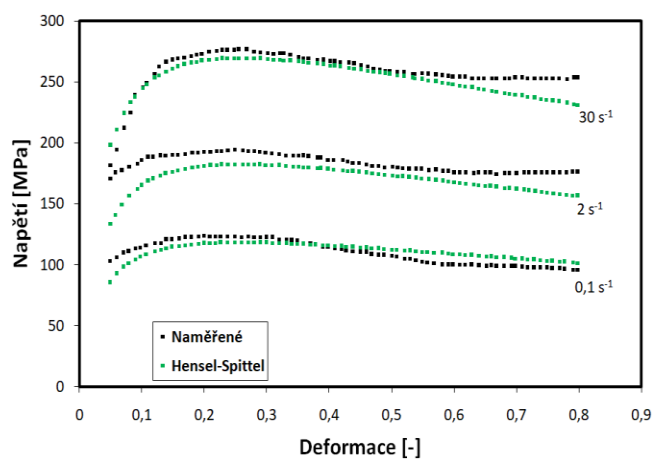
**Tab. 9** Hodnoty materiálových konstant a koeficientu determinace pro model Hensel-Spittel

| P1        | P2      | P3     | P4     | P5      | P6      | P7      | P8      | P9     | $R^2$  |
|-----------|---------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|
| 4888,5267 | -0,0044 | 0,4309 | 0,1281 | -0,0167 | -0,0006 | -0,0483 | -0,4333 | 0,0004 | 0,9778 |

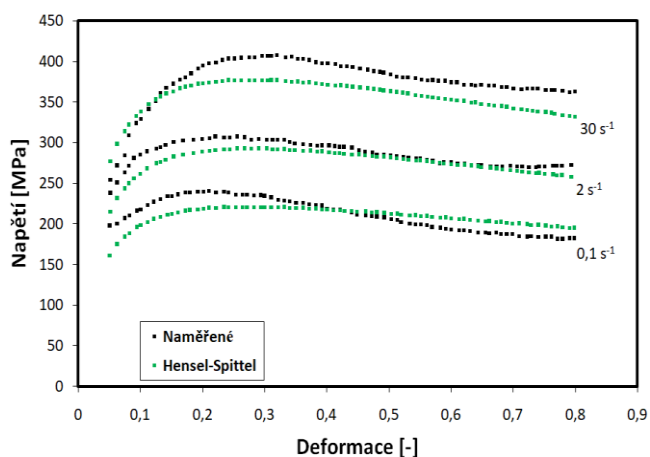
Na základě nově získaných hodnot materiálových konstant v **tab. 9** bylo dosaženo opět nových teoretických hodnot deformačních odporů, které byly srovnány pomocí grafických závislostí se skutečnými hodnotami deformačních odporů pro konkrétní hodnoty teplot deformace (880, 980, 1100 a 1240 °C) a rychlosti deformace (0,1, 2 a 30 s<sup>-1</sup>). Tyto grafy jsou znázorněny na **obr. 33** až **36**. Jak je možno vypočítat, tak pro model Hensel-Spittel je největší komplikace kombinace vysoké teploty deformace a vysoké rychlosti deformace (**obr. 33**) podobně jako tomu bylo u modelu Schindler aj. Při nízké rychlosti deformace za vysoké teploty deformace je vidět, že rozptyl dat není tak vysoký. Při teplotě 1100 °C (**obr. 34**) se skutečné hodnoty podobají nově získaným hodnotám podle modelu Hensel-Spittel a to i při rychlosti deformace 30 s<sup>-1</sup>. Model Hensel-Spittel má tedy menší problémy při predikci za nižších teplot deformace a nižších rychlostí deformace, což můžeme sledovat na **obr. 35**.



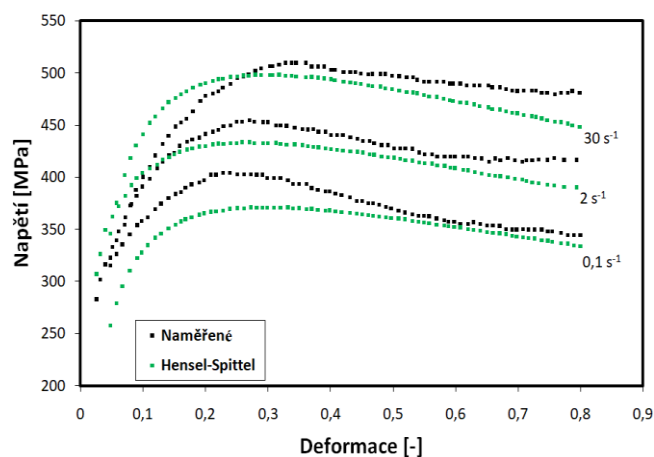
**Obr. 33** Grafické srovnání naměřeného a podle modelu Hensel-Spittel vypočteného přirozeného deformačního odporu zkoumané slitiny pro teplotu deformace 1240 °C



**Obr. 34** Grafické srovnání naměřeného a podle modelu Hensel-Spittel vypočteného přirozeného deformačního odporu zkoumané slitiny pro teplotu deformace 1100 °C

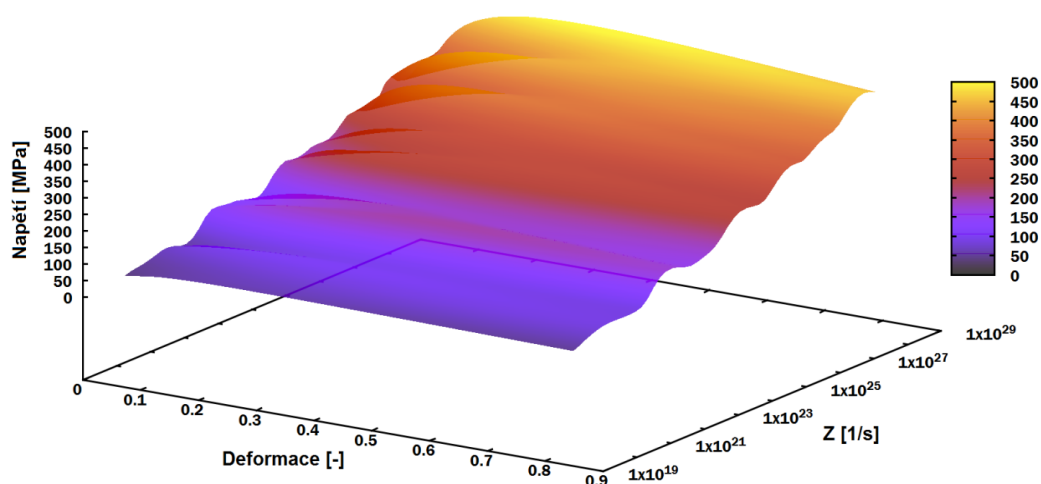


**Obr. 35** Grafické srovnání naměřeného a podle modelu Hensel-Spittel vypočteného přirozeného deformačního odporu zkoumané slitiny pro teplotu deformace 980 °C



**Obr. 36** Grafické srovnání naměřeného a podle modelu Hensel-Spittel vypočteného přirozeného deformačního odporu zkoumané slitiny pro teplotu deformace 880 °C

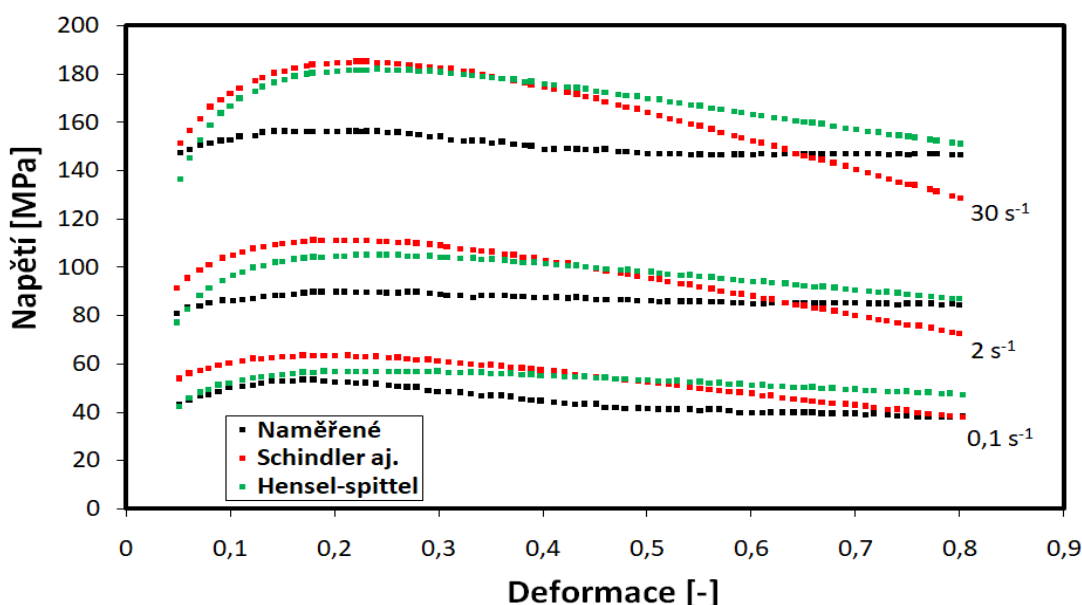
Z nově získaných dat napětí a deformace pro model Hensel-Spittel, byla opět vytvořena 3D grafická závislost napětí na deformaci a Zener-Hollomonovu parametru (**obr. 37**). Obdobně jako pro model Schindler aj. jsou hodnoty přirozeného deformačního odporu pro nejvyšší hodnoty parametru  $Z$  mírně nižší než v případě naměřených dat. Co se týče srovnání průběhu přirozeného deformačního odporu před píkem, tak zvlnění je v tomto případě větší než u modelu Schindler aj. a je více podobné naměřeným hodnotám a odpovídá tak více realitě.



**Obr. 37** 3D graf závislosti nově získaného napětí na deformaci a Zener-Hollomonovu parametru pro model Hensel-Spittel

#### 5.4. Porovnání matematických modelů s experimentálními daty

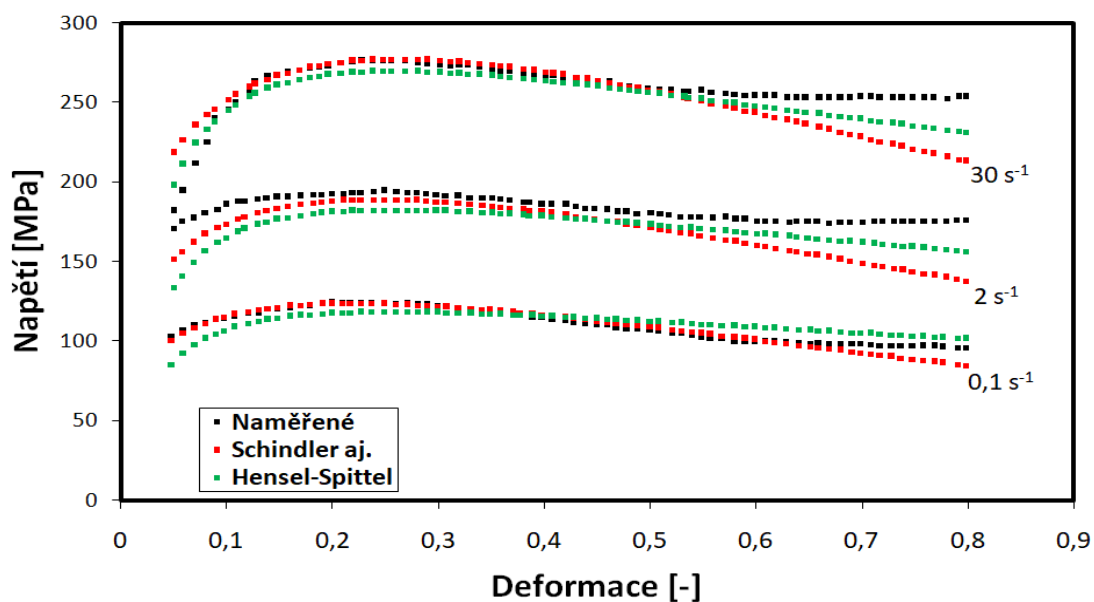
Pro porovnání skutečných (naměřených) a predikovaných hodnot dle modelu Schindler aj. a modelu Hensel-Spittel, byly sestaveny grafické závislosti, které jsou znázorněny na **obr. 37** až **40**. Při nejvyšší teplotě deformace v tomto případě 1240 °C a nejvyšší rychlosti deformace 30 s<sup>-1</sup> mají oba modely velké problémy s predikcí deformačního odporu, což je patrné z **obr. 37**. Čím je nižší hodnota rychlosti deformace, tím se predikované hodnoty blíží ke skutečným hodnotám. Na **obr. 37** si lze také všimnout, že hodnoty maximálního napětí se pohybují nad skutečnými hodnotami a to u všech rychlostí deformace, největší rozptyl je však u rychlosti deformace 30 s<sup>-1</sup>.



**Obr. 37** Grafické srovnání naměřeného a podle modelů Schindler aj. a Hensel-Spittel vypočteného přirozeného deformačního odporu zkoumané slitiny pro teplotu deformace 1240 °C

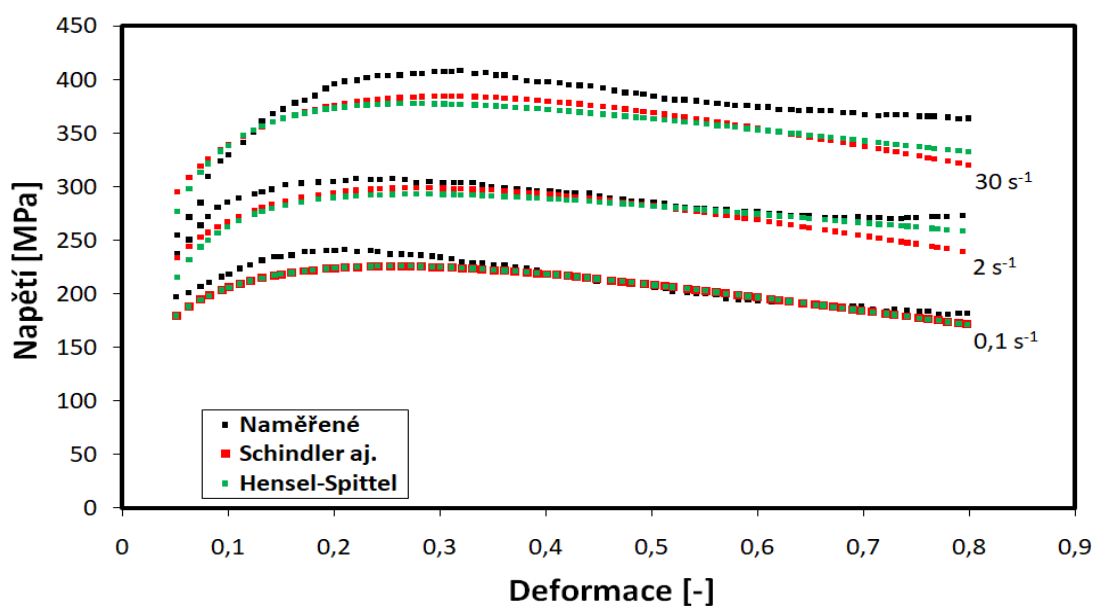
**Obr. 38** znázorňuje srovnání deformačních odporů pro teplotu 1100 °C. Lze si povšimnout, že predikované hodnoty jak pro model Schindler aj., tak pro model Hensel-Spittel se velmi blíží ke skutečným hodnotám deformačních odporů. U rychlosti deformace 2 s<sup>-1</sup> na **obr. 38** je zřejmé, že model Schindler aj. lépe kopíruje křivku v místě maximálního napětí a naopak model Hensel-Spittel má lepší odhad v oblasti ustáleného plastického toku. Dále bylo zjištěno, že model Hensel-Spittel není schopen korektně popsat reálné chování deformačního odporu, ale pouze napodobuje tvar napěťové křivky.





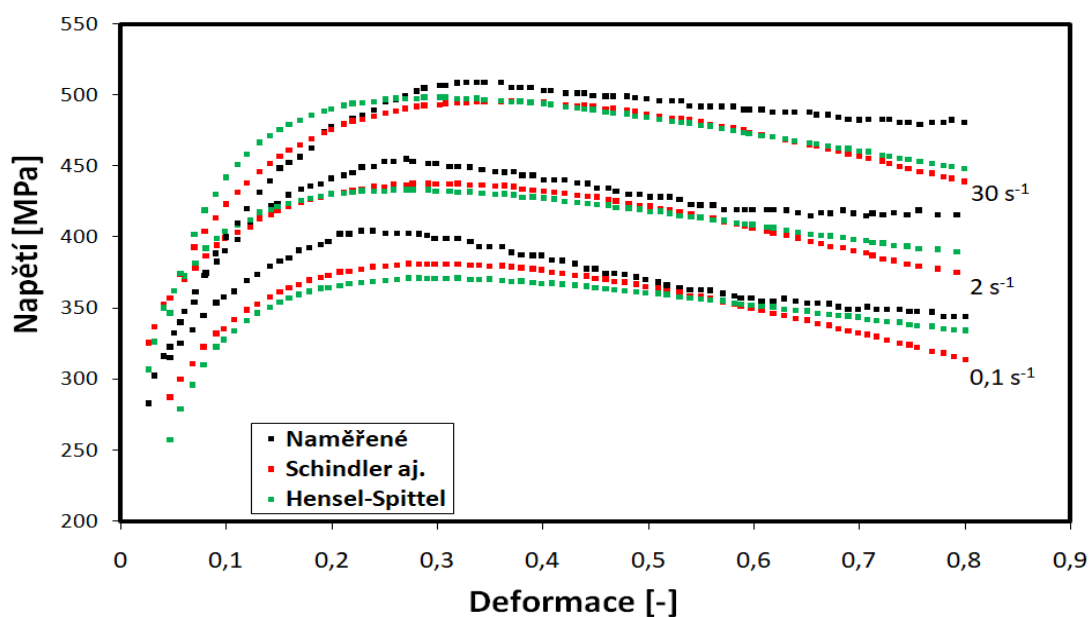
**Obr. 38** Grafické srovnání naměřeného a podle modelů Schindler aj. a Hensel-Spittel vypočteného přirozeného deformačního odporu zkoumané slitiny pro teplotu deformace 1100 °C

Pro teplotu 980 °C byla sestrojena grafická závislost na **obr. 39**. Z grafu je patrné, že predikované hodnoty deformačních odporů obou modelů se nachází pod hodnotami skutečnými (naměřenými). Ovšem největší rozptyl je u rychlosti deformace 30 s<sup>-1</sup>. Směrem k nižším hodnotám deformačních rychlostí se predikované hodnoty deformačních odporů blíží k hodnotám skutečným.



**Obr. 39** Grafické srovnání naměřeného a podle modelů Schindler aj. a Hensel-Spittel vypočteného přirozeného deformačního odporu zkoumané slitiny pro teplotu deformace 980 °C

Na **obr. 40** je znázorněna grafická závislost pro nejnižší teplotu 880 °C. Predikované hodnoty opět leží mírně pod hodnotami skutečnými. Z grafu je znovu patrné, že odhad modelu Schindler aj. lépe zvládá oblast napětového píku a model Hensel-Spittel oblast ustáleného plastického toku.

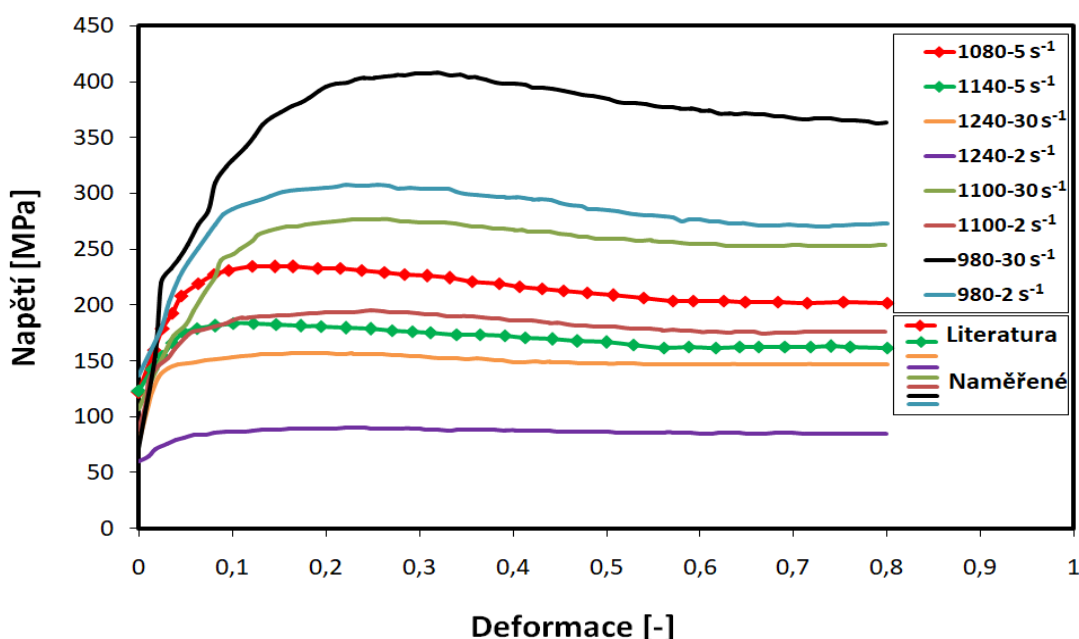


**Obr. 40** Grafické srovnání naměřeného a podle modelů Schindler aj. a Hensel-Spittel vypočteného přirozeného deformačního odporu zkoumané slitiny pro teplotu deformace 880 °C

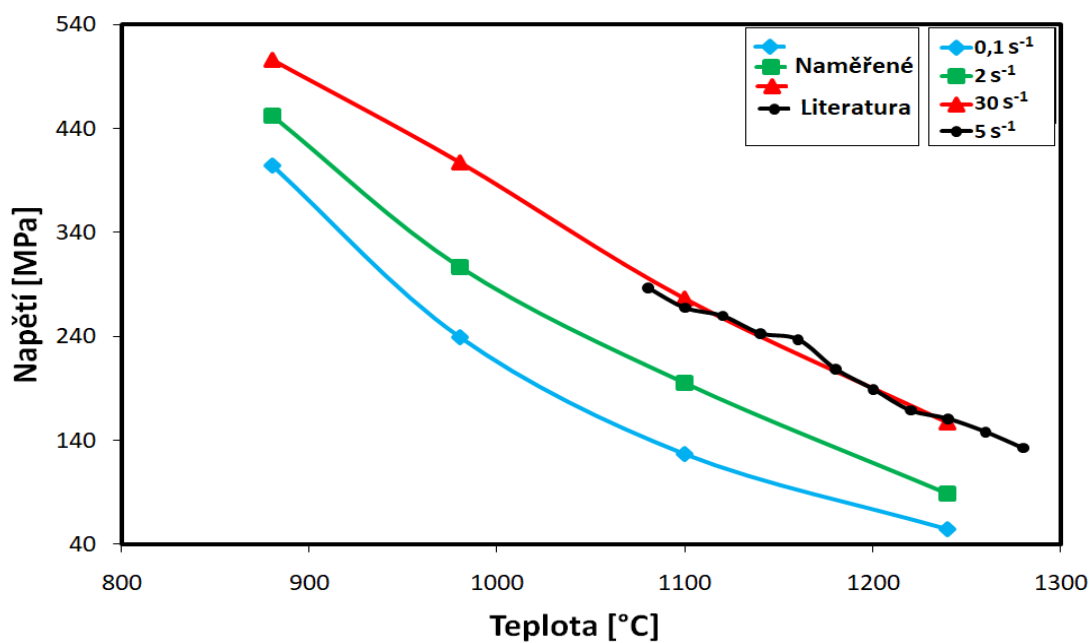
### 5.5. Porovnání zkoumané slitiny INCOLOY 825 s dalšími zdroji

Na **obr. 41** jsou porovnány napět'ové křivky slitin INCOLOY 825, jak experimentálně zkoumané tak i slitiny, která je zmíněna v kapitole 2.3.6. a má mírně rozdílné chemické složení. Tato slitina byla testována při teplotách 1080 a 1140 °C a rychlosti deformace 5 s<sup>-1</sup>. Jak je patrné z grafu, tak napět'ové křivky při teplotě 980 °C a deformační rychlosti 2 a 30 s<sup>-1</sup> leží nad křivkami této slitiny a naopak napět'ové křivky pro teplotu 1240 °C a deformační rychlosti 2 a 30 s<sup>-1</sup> leží pod těmito křivkami. Jediná napět'ová křivka při teplotě 1100 °C a rychlosti deformace 2 s<sup>-1</sup> se nachází mezi křivkami teplot 1080 a 1040 °C, což se dalo předpokládat.

Slitina z kapitoly 2.6.3. byla ještě porovnána s námi zkoumanou slitinou v grafické závislosti maximálního napětí na teplotě **obr. 42**. Předpokládalo se, že by se křivka pro deformační rychlost 5 s<sup>-1</sup> měla nacházet mezi křivkami 2 a 30 s<sup>-1</sup>. Z **obr. 42** lze vypožorovat, že křivka pro 5 s<sup>-1</sup> se částečně překrývá s křivkou 30 s<sup>-1</sup>, je možné, že by to mohlo být z důvodu mírně rozdílného chemického složení, nebo jiných třecích podmínek mezi kovadly a to z důvodu použití jiného maziva a podložek ovlivňujících tření.



**Obr. 41** Grafické porovnání napět'ových křivek dvou slitin INCOLOY 825 s mírně rozdílným chemickým složením



**Obr. 42** Grafické porovnání maximálního napětí v závislosti na teplotě dvou slitin INCOLOY 825 s mírně rozdílným chemickým složením

## 6. Závěr

Předmětem prezentované diplomové práce byl popis přirozených deformačních odporů niklové slitiny INCOLOY 825, přičemž tento popis byl realizovaný na základě provedených testů jednoosým tlakem na zařízení Gleeble 3800. Analýzou naměřených dat byly na křivkách závislosti napětí na deformaci lokalizovány souřadnice napětíových píků, což bylo využito pro stanovení aktivační energie při tváření za tepla této niklové slitiny. Samotná hodnota aktivační energie byla vyčíslena s využitím automatického režimu softwaru ENERGY 4.0 na  $602,6 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ . Znalost této materiálové konstanty byla využita pro predikci nových souřadnic napětíového píku, ze kterých v závislosti na teplotě a deformační rychlosti byly vytvořeny přehledné 3D mapy.

Přirozený deformační odpor slitiny INCOLOY 825 byl navíc pro celý rozsah kombinací deformace, deformačních rychlostí a teplot popsán i matematicky. K tomuto účelu bylo využito dvou matematických modelů. Prvním je model Schindler aj. a jako druhý byl vybrán model Hensel-Spittel.

V programu Unistat byly za pomoci příslušných hodnot deformačních rychlostí, teplot a píkových deformací získány materiálové konstanty pro zadané matematické modely popisující deformační odpor za tepla. Model Schindler aj. obsahuje celkem pět materiálových konstant a model Hensel-Spittel zahrnuje těchto konstant devět.

Pomocí regresní analýzy byl získán soubor hodnot s koeficientem determinace  $R^2$  0,9768 pro model Schindler aj. a 0,9778 pro model Hensel-Spittel, což pro oba modely signalizuje poměrně dobrou shodu s naměřenými hodnotami. Z výsledných hodnot získaných po dosazení do modelu Schindler aj. a do modelu Hensel-Spittel je patrné, že oba modely daleko lépe zvládají odhad deformačních odporů za nižších teplot deformace a nižších deformačních rychlostí. Na základě nově získaných hodnot byly sestaveny pro oba modely prostorové 3D mapy přirozeného deformačního odporu v závislosti na deformaci a Zener-Hollomonovu parametru. Protože model Hensel-Spittel v sobě nezahrnuje hodnotu deformace do píku, nedokáže správně popsat kinetiku dynamické rekystalizace. Model Hensel-Spittel má naopak výhodu v univerzálním popisu napětíové křivky, kde lépe popisuje oblast ustáleného plastického toku. Model Hensel-Spittel má vyšší množství materiálových konstant, a tak byl při regresní analýze obtížněji zpracován. Bylo tedy ověřeno, že pro popis deformačního odporu niklové slitiny INCOLOY 825 je možné použít oba testované modely, každý z nich v sobě ale nese jiné výhody a nevýhody použití.

V poslední části byly porovnány naměřené hodnoty přirozeného deformačního odporu zkoumané slitiny s hodnotami z vybraných zdrojů odborné literatury, přičemž bylo dosaženo relativně solidní shody. Data získaná z odborných zdrojů za mírně odlišných podmínek než v případě v této práci provedených experimentů byla vymezena v očekávaném prostoru, což potvrdilo věrohodnost této práce, která zároveň přispěla k podrobnějšímu popisu deformačního chování slitiny INCOLOY 825.

---

**Literatura**

- [1] NĚMEC, M.; PROVAZNÍK, J. *Slévárenské slitiny neželezných kovů*. 1. vyd. Praha: ČVUT Praha, 2008. 137 s. ISBN 978-80-01-04116-1
- [2] *Amethyst Galleries' Mineral Gallery* [online]. Copyright ©1995 [cit. 17.04.2019]. Dostupné z: <http://www.galleries.com/Pentlandite>
- [3] Nikl - Arnika. *Hlavní stránka - Arnika* [online]. Copyright © 2014 Arnika [cit. 17.04.2019]. Dostupné z: <https://arnika.org/nikl>
- [4] LEŠKO, J.; TRŽIL, J.; ŠTARHA, R. *Anorganická chemie*. 1. vyd. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 1999. 256 s. ISBN 80-7078-692-2
- [5] ENGHAG, P. *Encyclopedia of the elements: technical data, history, processing, applications*. Weinheim: Wiley-VCH, c2004. ISBN 3527306668.
- [6] PÍŠEK, F.; JENÍČEK, L.; RYŠ, P.; CENEK, M. *Nauka o materiálu I: Nauka o kovech 3. svazek, Neželezné kovy*. ACADEMIA, Praha, 1973, 595 s.
- [7] Nickel: uses, applications-Metalpedia. *Metalpedia - The World's Largest Metalpedia Information Center* [online]. Dostupné z: <http://metalpedia.asianmetal.com/metal/nickel/application.shtml>
- [8] DAVIS, J., R. *ASM Speciality Handbook: Nickel, Cobalt and their Alloys*. ASM Ohio, USA, 2000. 421 s.
- [9] MAZANCOVÁ, E. *Materiály pro náročné technické aplikace*, VŠB-TU Ostrava, 2008.
- [10] ČÍHAL, V. *Korozivzdorné oceli a slitiny*. Praha: Academia, 1999. Česká matice technická (Academia). ISBN 80-200-0671-0
- [11] SHARMA, C. P. *Engineering materials: Properties and Applications of Metals and Alloys*, New Delhi: Prentice-Hall of India, 2004. 285 s.
- [12] What is the Difference Between Inconel® and Incoloy®? - Continental Steel & Tube Company. *Continental Steel & Tube Co.* [online]. Copyright © 2019 Continental Steel [cit. 17.04.2019]. Dostupné z: <https://continentalsteel.com/blog/what-is-the-difference-between-inconel-and-incoloy/>
- [13] VŠB-TUO - 403 [online]. Copyright ©5 [cit. 16.04.2019]. Dostupné z: [http://katedry.fmmi.vsb.cz/Opory\\_FMMI/633/633SchindlerMetalurgickatvaritelnost.pdf](http://katedry.fmmi.vsb.cz/Opory_FMMI/633/633SchindlerMetalurgickatvaritelnost.pdf)

- 
- [14] VŠB-TUO - 404. [online]. Copyright ©2019 VŠB [cit. 16.04.2019]. Dostupné z: [https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/deformacnichovanimaterialu/Schindler\\_Kawulok\\_Deformacni\\_chovani\\_materialu.pdf](https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/deformacnichovanimaterialu/Schindler_Kawulok_Deformacni_chovani_materialu.pdf)
- [15] SELLARS, C. M., MCTEGART, W. J. On the mechanism of hot deformation. *Acta Metallurgica*. 1966, roč. 14, č. 9, s. 1136-1138.
- [16] ŽÍDEK, M. *Metalurgická tvařitelnost ocelí za tepla a za studena*. 1. vydání. Praha: Aleko, 1995. 348 s. ISBN 80-85341-45-X.
- [17] OPĚLA, P. *Popis deformačního odporu za tepla v širokém intervalu termomechanických podmínek*. Ostrava, 2017. Disertační práce. VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, Katedra tváření materiálu.
- [18] VŠB-TUO - 403 [online]. Copyright © [cit. 16.04.2019]. Dostupné z: <http://katedry.fmmi.vsb.cz/Opory FMMI/633/633Plasticita%20mareri%C3%A1lu.pdf>
- [19] MOHAMMAD, A.; HAMID, O.; BEHZAD, F. Prediction of hotcompression flow curves of Ti-6Al-4V alloy in  $\alpha + \beta$  phase region. *Materials & Design*. 2011, č. 32, s. 4689-4695.
- [20] GRONOSTAJSKI, Z. The constitutive equations for FEM analysis. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000, č. 106, s. 40-44.
- [21] XIAO, Y.; GUO, C. Constitutive modelling for high temperature behavior of 1Cr12Ni3Mo2VNbN martensitic steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2011, č. 528, s. 5081-5087.
- [22] QUAN, G.; et al. A characterization for the flow behavior of 42CrMo steel. *Computational Materials Science*. 2010, č. 50, s. 167-171.
- [23] MIRZADEH, H.; NAJAFIZADEH, A. Flow stress prediction at hot working conditions. *Materials Science and Engineering: A*. 2010, č. 527, s. 1160-1164.
- [24] ZENG, Z.; et al. Modeling the flow stress for single peak dynamic recrystallization. *Materials & Design*. 2009, č. 30, s. 1939-1943.
- [25] FAN, B.; MENG, L. Research on mathematical models of flow stress for 0Cr13Mn stainless. In *2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010): October 22-24, 2010, Taiyuan*. č. 7, s. V7-471 - V7-473. ISBN: 978-1-4244-7237-6.
- [26] YU, M.; LI, J.; TANG, H.; BAO, Y. Hot Working Characteristics of Corrosion-Resistant Alloys G3 and 825. *Journal of Iron and Steel Research*, roč. 18, č. 4, s. 68-72.
-



- 
- [27] MUNIR, A., et al. Microstructure characterisation in alloy 825. *Procedia Manufacturing* 15 (2018) s. 1626–1634
- [28] *Special Metals Company* [online]. Dostupné z: <http://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/incoloy/incoloy-alloy-0825.pdf>
- [29] *Použití slitiny INCOLOY 825*[online].© 2019 [cit. 2019-4-15]. Dostupné z: <http://www.cuttingedgedubai.com/product/incoloy-alloy-825/>
- [30] Conventional Thermomechanical Simulator - Gleeble 3800 - LNNano LNNano. *LNNano - Brazilian Nanotechnology National Laboratory LNNano* [online]. Copyright © [cit. 16.04.2019]Dostupné z:<http://lnnano.cnpem.br/laboratories/cpm/facilities/gleeble/>
- [31] PODSTUVKA, D. *Aktivační energie při tváření za tepla*. Ostrava, 2003. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – TU Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, Katedra automatizace a počítačové techniky v metalurgii.
- [32] Unistat Statistics Software | Reviews. *Unistat Statistics Software | UNISTAT® | UNISTAT – the ultimate Excel statistics add-in*[online]. Copyright © 1984 [cit. 17.04.2019]. Dostupné z:<https://www.unistat.com/products/reviews/>
- [33] GRONOSTAJSKI, Z. The constitutive equations for FEM analysis. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000, č. 106, s. 40-44.
- [34] SCHINDLER, I.; BOŘUTA, J.: Deformační odpory ocelí při vysokoredukčním tváření za tepla. *Hutnické listy*. 1995, roč. 50, č. 7/8, s. 47-50.
- [35] BEHRENS, B.; CONRADS, H.; PETROV, P.: Effect of temperature and strain rate on friction factor during microforming of AW-6082 Al-Alloy. *International Journal of Material Forming*. 2009, č. 2, s. 613-616.
- [36] PETROV, P.; ABBOD, M. Analysis of rheological behavior of Al-Cu-Mg-Fe-Ni alloy at elevated temperatures using phenomenological flow stress model. *International journal of material forming*. 2009, č. 2, s. 371-374.